

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Laboratorní úloha pro měření radioaktivních emisí**  
**Laboratory Task to Measure Radioactive Emissions**

**2019**

**Adam Velkoborský**

## Zadání

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Velkoborský**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik  
Téma: **Laboratorní úloha pro měření radioaktivních emisí**  
**Laboratory Task to Measure Radioactive Emissions**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou vzniku radioaktivity.
2. Seznámení se s účinky radioaktivity na živý organismus.
3. Seznámení se s možnostmi měřicího modulu radioaktivity a radonu.
4. Návrh a realizace měření a vizualizace dat.
5. Provedení měření a testů.
6. Zhodnocení dosažených výsledků měření.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] CHMELÁŘ, M., A. DRASTICH a J. ROZMAN. *Lékařská přístrojová technika* 2. 1. vyd. Praha : Nakladatelství techn. lit., 1984. 179 s.
- [2] CHMELÁŘ, Milan. *Lékařská přístrojová technika I*. Brno: CERM, 1995. 192 s. ISBN 80-8586-763-X.
- [3] BRONZINO, Joseph D. *The biomedical engineering handbook*. Boca Raton: CRC Press, c1995, xxxii, 2862 s. ISBN 0-8493-8346-3/978-0849383465.
- [4] SVATOŠ, Josef. *Biologické signály I: geneze, zpracování a analýza*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, c1992, 204 s. ISBN 80-01-00884-3.
- [5] PENHAKER, Marek, Martin IMRAMOVSKÝ, Petr TIEFENBACH a František KOBZA. *Lékařské diagnostické přístroje: učební texty*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 320 s. ISBN 80-248-0751-3.
- [6] CARR, Joseph J a John M BROWN. *Introduction to biomedical equipment technology*. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, c2001, xv, 743 s. ISBN 0-13-010492-2.
- [7] MACKAY, R. Stuart. *Bio-medical telemetry: sensing and transmitting biological information from animals and man*. 2nd ed. New York: IEEE Press, c1993, xiv, 540 s. ISBN 0-7803-4718-8.
- [8] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, c2010, xv, 663 s. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [9] WEBSTER, John G a John W CLARK. *Medical instrumentation: application and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, c1998, xix, 691 s. ISBN 0-471-15368-0.
- [10] PEREZ, Reinaldo. *Design of medical electronic devices*. San Diego: Academic Press, c2002, xi, 279 s. ISBN 0-12-550711-9.
- [11] MALMIVUO, Jaakko a Robert PLONSEY. *Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*. New York: Oxford University Press, 1995, 512s. ISBN-10: 0195058232, ISBN-13: 978-0195058239.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

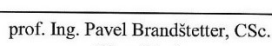
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Marek Penhaker, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019



  
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2019

.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce prof. Ing. Marku Penhakerovi, Ph.D. za užitečné rady, odbornou pomoc a konzultace při vytváření této bakalářské práce.

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 30. dubna 2019

.....  
podpis zástupce

## **Abstrakt**

Laboratorní úloha pro měření radioaktivních emisí je konstruovaná pro studenty oboru biomedicínského inženýrství. Hlavní účel práce je seznámit studenty se základními principy chování radioaktivního a ionizujícího záření. Teoretická část práce má za úkol seznámit čtenáře s problematikou vzniku radioaktivity a jejími vlivy na živý organismus. Teoreticky také popisuje možnosti měřících modulů radioaktivity. Praktická část pak obsahuje popis zapůjčených radiometrů, návrh laboratorní úlohy pro měření radioaktivních emisí, ve které je měřen přírodní zdroj radioaktivního záření, koncentrace radonu v místnostech a umělý zdroj ionizujícího záření X. Součástí práce je i zpracovaný vzorový protokol s veškerými výsledky měření.

## **Klíčová slova**

Radioaktivní emise; měření radiace; laboratorní úloha; radiace; ionizující záření; záření X; rentgenové záření; radon; koncentrace radonu; měření koncentrace radonu; radiometry

## **Abstract**

Laboratory Task to Measure Radioactive Emissions is designed for students of biomedical engineering. Main purpose of this Bachelor thesis is to teach students basic principles of ionizing radiation. The theoretical part of the thesis aims to acquaint the reader with the issue of the origin of radioactivity and its effects on living organism. It describes various options of measurement modules of radioactivity. The practical part contains description of borrowed radiometers, designing of laboratory task for measurement of radioactive emissions, in which the natural source of radiation, radon concentration in rooms and artificial source of ionizing X-ray are measured.

## **Key words**

Radioactive emissions; radiation measurements; laboratory task; radiation; ionizing radiation; X radiation; X-rays; radon; radon concentrations; radon concentration measurements

# Obsah

Seznam použitých zkratk.....	- 12 -
Seznam ilustrací a tabulek.....	- 13 -
Seznam ilustrací .....	- 13 -
Seznam grafů.....	- 13 -
Seznam tabulek.....	- 13 -
Úvod.....	- 15 -
1    Radioaktivita .....	- 16 -
1.1    Zdroje záření .....	- 18 -
1.1.1    Primární přírodní radionuklidy .....	- 18 -
1.1.2    Druhotné přírodní radionuklidy .....	- 19 -
1.1.3    Kosmogenní radionuklidy .....	- 19 -
1.1.4    Radioaktivní pozadí.....	- 20 -
1.1.4.1    Radon.....	- 22 -
1.1.5    Umělé zdroje záření.....	- 22 -
1.1.5.1    Lineární urychlovač.....	- 23 -
1.1.5.2    Kruhový urychlovač .....	- 24 -
1.1.5.3    Rentgenka .....	- 25 -
1.1.5.4    Anihilace elektron – pozitron .....	- 26 -
1.2    Veličiny a jednotky .....	- 26 -
1.2.1    Aktivita.....	- 26 -
1.2.2    Dávka.....	- 26 -
1.2.3    Expozice .....	- 26 -
1.2.4    Kerma .....	- 27 -
1.2.5    Jakostní faktor .....	- 27 -
1.2.6    Ekvivalentní dávka .....	- 28 -
1.3    Limity ozáření .....	- 28 -
1.4    Radiorezistence a radiorezistivita.....	- 29 -
1.5    Účinky ionizujícího záření na organismus .....	- 29 -
1.5.1    Stochastické účinky .....	- 30 -
1.5.2    Deterministické účinky.....	- 30 -
1.5.3    Volné radikály .....	- 30 -



1.5.4	Účinek na DNA .....	- 31 -
1.5.5	Malé dávky záření .....	- 31 -
1.6	Základní způsoby ochrany před zářením.....	- 31 -
1.6.1	Protiradonové opatření .....	- 32 -
2	Detekce záření .....	- 33 -
2.1	Základní rozdělení detektorů ionizujícího záření .....	- 33 -
2.1.1	Podle časového průběhu .....	- 33 -
2.1.2	Podle principu detekce .....	- 33 -
2.1.3	Podle komplexnosti informace .....	- 33 -
2.2	Fotografická detekce .....	- 34 -
2.2.1	Materiálové detektory.....	- 34 -
2.3	Ionizační komory.....	- 35 -
2.3.1	Mrtvá doba detektorů .....	- 35 -
2.4	Scintilační detektor.....	- 36 -
2.5	Polovodičové detektory .....	- 36 -
2.6	Magnetický spektrometr.....	- 36 -
2.7	Měření radonu .....	- 36 -
3	Seznámení se s parametry přístrojů.....	- 38 -
3.1	Radiometr RBG T 62 a.....	- 38 -
3.2	Operativní měřič radiace RADOS RDS-30.....	- 39 -
3.3	GUARD AQM-22 MEPA .....	- 40 -
3.4	Detektor radonu SIRAD MR-106 N .....	- 41 -
3.5	Gama detektor PM1208M .....	- 41 -
3.6	Shrnutí parametrů radiometrů .....	- 42 -
3.7	RTG Leybold.....	- 43 -
4	Laboratorní úloha pro měření radioaktivních emisí .....	- 45 -
4.1	Cíl úlohy.....	- 45 -
4.2	Zadání.....	- 45 -
4.3	Předpokládané znalosti.....	- 45 -
4.4	Vstupní otázky.....	- 45 -
4.5	Použité vybavení .....	- 45 -
4.6	Teoretický rozbor .....	- 46 -
4.6.1	Dělení radioaktivního záření a naše ochrana .....	- 46 -

4.6.2	Zdroje radiace.....	- 47 -
4.6.2.1	Radon.....	- 47 -
4.6.3	Radiace a organismus .....	- 48 -
4.6.4	Měření radiace .....	- 48 -
4.7	Postup měření .....	- 48 -
4.8	Postup k bodu zadání č.1: Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry - 48 -	
4.8.1.1	Měření přírodního zdroje všemi dostupnými radiometry .....	- 49 -
4.8.1.2	Měření přírodního zdroje na různé vzdálenosti .....	- 49 -
4.8.1.3	Měření přírodních zdrojů v závislosti na stínění .....	- 50 -
4.8.2	Postup k bodu zadání č.2: Měření koncentrace radonu .....	- 51 -
4.8.3	Postup k bodu zadání č.3: Paprsky X kolem nás a jak se chovají .....	- 51 -
4.8.3.1	Seznámení se s RTG Leybold .....	- 52 -
4.8.3.2	Měření ionizujícího záření v okolí RTG.....	- 52 -
4.8.3.3	Měření ionizujícího záření v experimentální komoře RTG.....	- 53 -
4.8.3.4	Měření radiace vzorku zkoumaného v RTG.....	- 54 -
4.9	Kontrolní otázky.....	- 55 -
4.10	Seznam použité literatury .....	- 55 -
5	Vzorový protokol o laboratorní úloze pro měření radioaktivních emisí .....	- 56 -
5.1	Cíl úlohy.....	- 56 -
5.2	Zadání.....	- 56 -
5.3	Použité vybavení .....	- 56 -
5.4	Vstupní otázky.....	- 56 -
5.5	Postup měření.....	- 57 -
5.5.1	Postup pro bod zadání č.1: Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry - 57 -	
5.5.1.1	Měření přírodního zdroje všemi dostupnými radiometry .....	- 57 -
5.5.1.2	Měření přírodního zdroje na různé vzdálenosti .....	- 57 -
5.5.1.3	Měření přírodních zdrojů v závislosti na stínění .....	- 58 -
5.5.2	Postup k bodu zadání č.2: Měření koncentrace radonu .....	- 58 -
5.5.3	Postup k bodu zadání č.3: Paprsky X kolem nás a jak se chovají .....	- 58 -
5.5.3.1	Seznámení se s RTG Leybold .....	- 58 -
5.5.3.2	Měření ionizujícího záření v okolí RTG.....	- 58 -
5.5.3.3	Měření ionizujícího záření v experimentální komoře RTG.....	- 58 -

5.5.3.4	Měření radiace vzorku zkoumaného v RTG.....	- 59 -
5.6	Výsledky.....	- 60 -
5.6.1	Výsledky pro bod zadání č.1: Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry - 60 -	
5.6.1.1	Měření přírodního zdroje všemi dostupnými radiometry .....	- 61 -
5.6.1.2	Měření přírodního zdroje na různé vzdálenosti .....	- 61 -
5.6.1.3	Měření přírodních zdrojů v závislosti na stínění .....	- 62 -
5.6.2	Výsledky k bodu zadání č.2: Měření koncentrace radonu.....	- 63 -
5.6.3	Výsledky k bodu zadání č.3: Paprsky X kolem nás a jak se chovají.....	- 64 -
5.6.3.1	Seznámení se s RTG Leybold .....	- 64 -
5.6.3.2	Měření ionizujícího záření v okolí RTG.....	- 65 -
5.6.3.3	Měření ionizujícího záření v experimentální komoře RTG.....	- 66 -
5.6.3.4	Měření radiace vzorku zkoumaného v RTG.....	- 68 -
5.7	Kontrolní otázky.....	- 69 -
	Závěr .....	- 70 -
	Přínos laboratorní úlohy pro studenta.....	- 71 -
	Použitá literatura .....	- 72 -

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>RDS-30</b>	Operativní měřič radiace RADOS RDS-30
<b>PM1208M</b>	Gama indicator PM1208M

# Seznam ilustrací a tabulek

## Seznam ilustrací

Obrázek 1.1 Vznik alfa částice [20] .....	16 -
Obrázek 1.2 Vznik beta minus částice [20] .....	17 -
Obrázek 1.3 - Vzniku záření gama [3]. .....	18 -
Obrázek 1.4 Přírodní rozpadové řady [4] .....	19 -
Obrázek 1.5 Schéma elektrostatického lineárního urychlovače [12] .....	23 -
Obrázek 1.6 Schéma vysokofrekvenčního lineárního urychlovače [12] .....	24 -
Obrázek 1.7 Vlevo synchrotron, vpravo cyklotron [12] .....	25 -
Obrázek 1.8 Schéma rentgenky [21] .....	25 -
Obrázek 2.1 Schématické provedení ionizační komory [16] .....	35 -
Obrázek 3.1 Radiometr RBG T 61 a s připojenou sondou a sluchátkem .....	38 -
Obrázek 3.2 Operativní měřič RADON RDS-30 .....	39 -
Obrázek 3.3 Radioaktivní hodinky .....	40 -
Obrázek 3.4 Analyzátor plynů GUARD AQM-22 MEPA .....	40 -
Obrázek 3.5 Radonový detektor SIRAD MR-106 N .....	41 -
Obrázek 3.6 Hodinkový gama detektor PM1208M .....	42 -
Obrázek 3.7 RTG aparát Leybold .....	44 -
Obrázek 4.1 Vznik alfa a beta částice [20] .....	46 -
Obrázek 4.2 Vznik gama záření [20] .....	47 -
Obrázek 4.3 Umístění radiometru v RTG komoře .....	53 -
Obrázek 4.4 Umístění uhlí v experimentální komoře .....	55 -
Obrázek 5.1 Střed detektorů RDS-30 a PM1208M .....	60 -
Obrázek 5.2 Střed detektoru GUARD AQM-22 MEPA .....	60 -
Obrázek 5.3 RTG Leybold – popis částí .....	64 -
Obrázek 5.4 Rentgenka a její stěžejní části – popis částí .....	65 -

## Seznam grafů

Graf 1 Graf popisující rozdělení zdrojů ozáření průměrného člověka [5] .....	21 -
Graf 2 Dávkový příkon s rostoucí vzdáleností .....	62 -
Graf 3 Měření záření gama po průchodu stínícím materiálem .....	63 -
Graf 4 Grafické znázornění bezpečnostního měření .....	66 -
Graf 5 Graf závislosti dávkového příkonu na napětí nastaveném na RTG .....	67 -
Graf 6 Graf závislosti dávkového příkonu na proudu nastaveném na RTG .....	68 -

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Kosmogenní nuklidy vznikající v atmosféře [4]. .....	20 -
Tabulka 2 – Radioaktivita vybraných materiálů [5] .....	21 -
Tabulka 3 – Používané hodnoty jakostního faktoru .....	27 -
Tabulka 4 Specifikace radiometrů .....	42 -

Tabulka 5: Naměřené hodnoty k bodu zadání č. 1 .....	49 -
Tabulka 6 Naměřené hodnoty v závislosti na vzdálenost.....	50 -
Tabulka 7 Stínění.....	51 -
Tabulka 8 Koncentrace radonu.....	51 -
Tabulka 9 Měření úniků ionizujícího záření .....	52 -
Tabulka 10 Závislost hodnoty dávkového příkonu na napětí na rentgence.....	53 -
Tabulka 11 Závislost hodnoty dávkového příkonu na proudu rentgenky .....	54 -
Tabulka 12 Naměřený dávkový příkon různými radiometry .....	61 -
Tabulka 13 Dávkový příkon v závislosti na vzdálenost měřiče od zdroje .....	61 -
Tabulka 14 Úbytek radiace po průchodu stínícím materiálem.....	62 -
Tabulka 15 Naměřená koncentrace radonu v místnostech .....	63 -
Tabulka 16 Bezpečnostní měření kolem RTG přístroje .....	65 -
Tabulka 17 Závislost dávkového příkonu na napětí na rentgence.....	66 -
Tabulka 18 Závislost dávkového příkonu na proudu na rentgence .....	67 -

# Úvod

Radioaktivní a ionizující záření jsou nedílnou součástí moderní medicíny. Využití nachází jak při diagnostice, tak při terapeutických úkonech, zejména při léčbě onkologických onemocnění. Ve zdravotnických zařízeních se nachází velké množství vybavení a přístrojů, které mají co dělat s generováním a vyobrazováním ionizujícího záření, případně s vyzářením a nasměrováním radioaktivní emise. Proto je nezbytné, aby se studenti biomedicínského inženýrství s těmito fyzikálními procesy seznámili již v průběhu studia, poznali základní fyzikální projevy těchto druhů záření a naučili se s ním zacházet bezpečně.

Tato práce si tedy klade za cíl sestavení laboratorní úlohy pro měření radioaktivních emisí a ionizujícího záření. Úlohy jsou koncipovány tak, aby se student obeznámil s jednotlivými moduly pro měření radiace a potlačil radiofobii tím, že se před radiací naučí chránit. Základní principy ochrany před radioaktivním zářením, které si student vyzkouší, případně prokáže, jsou ochrana vzdáleností a ochrana stíněním. Jako přírodní radioaktivní gama zářič poslouží hodinky, jejichž ručičky obsahují 226-radum. Kromě měření v laboratoři se uskuteční také měření ve studentem zvolených prostorech, kde bude monitorovat radioaktivní plyn, který má nejvyšší podíl na celkovém ozáření populace, radon. Monitoring radonu nebude prováděn v laboratořích z důvodu vysoké časové náročnosti. U měření si student uvědomí zdravotní rizika radonu, seznámí se s doporučenými limity koncentrace radonu a ověří si, jestli jím zvolené prostory tyto limity splňují. Mimo radioaktivní emise bude student měřit i ionizující záření X, produkované rentgenkou z edukačního RTG firmy Leybold. Nezbytným prostudováním manuálu pro přístroje vede úloha studenta k naučení se základům ovládání RTG aparátu a bezpečnému používání. Student si ověří závislost záření X, produkovaného rentgenkou, na přivedeném napětí i proudu a provede bezpečnostní měření úniků záření v okolí experimentální komory RTG. Poslední experiment se zaměřuje na potlačení fobie z rentgenového záření tím, že si student ověří, jsou-li různé materiály schopny akumulovat ionizující záření X.

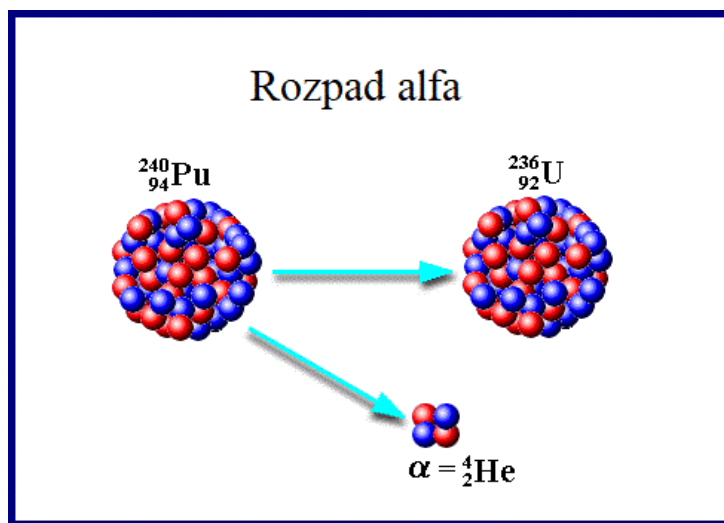
Celá laboratorní úloha je zamýšlena tak, aby student po jejím odměření vypracoval z nabytých výsledků laboratorní protokol o průběhu měření. Vzorový protokol, sloužící výhradně pro vyučujícího, je vypracován v poslední části práce. Klade se v něm důraz zejména na grafické vyobrazení naměřených hodnot a vyvození závěrů k jednotlivým výsledkům.

Celá práce taktéž obsahuje teoretický část, která se zabývá druhy ionizujícího záření a přírodními i umělými zdroji záření. Shrnuje veličiny a jednotky, se kterými se můžeme v radiometrii setkat a také popisuje principy funkce různých druhů radiometrů. Nemalá část se věnuje také vlivu ionizujícího záření na organismus a jak se před ním chránit. Samotná laboratorní úloha pro měření radioaktivních emisí obsahuje svůj vlastní teoretický úvod, která stručně shrnuje teoretickou část této práce.

# 1 Radioaktivita

Radioaktivita je jev, při kterém dochází k přeměně jádra prvku na jádro jiného prvku, přičemž dojde k uvolnění velkého množství energie. Energie se uvolní v podobě neviditelného ionizujícího záření, které ionizuje prostředí, jímž prochází. Podle druhu emitovaného záření rozdělujeme radioaktivitu na tři základní typy:  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$  [1].

Radioaktivita  $\alpha$  je charakteristická vyzářením jádra hélia, které obsahuje 2 protony a 2 neutrony. Částice  $\alpha$  z mateřského jádra odstraní 2 protony a 2 neutrony, čímž vytvoří nový, stabilnější prvek, který se posouvá o 2 místa v Mendělejevově periodické tabulce prvků. Záření  $\alpha$  je silně ionizující, málo pronikavé a snadno stínitelné. K jeho odstínění postačí list papíru.

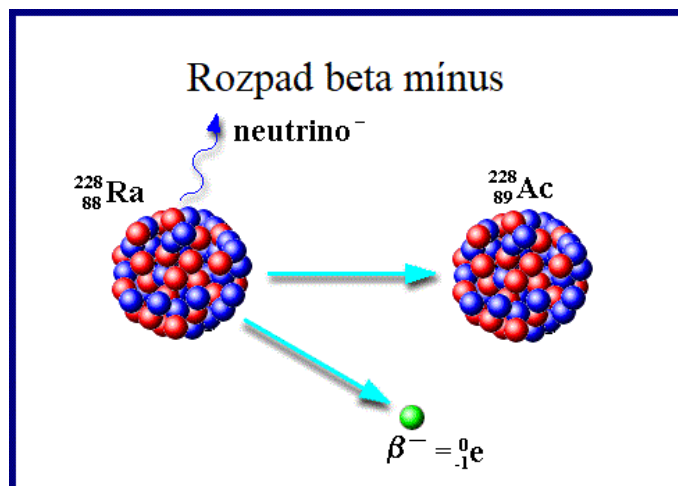


Obrázek 1.1 Vznik alfa částice [20]

Radioaktivita  $\beta$  je nejčastějším a nejdůležitějším zářením. Je asi stokrát intenzivnější než radioaktivita  $\alpha$ . K jejímu odstínění je dostačující hliníková deska o šířce aspoň 1 mm. Dělí se dále dělí do tří skupin:

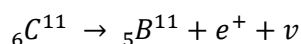
- Radioaktivita  $\beta^-$  je z těchto tří podskupin nejznámější. Při jaderné přeměně dojde k emitování částice  $\beta^-$  v podobě elektronu  $e^-$ . Elektron v jádře vznikne přeměnou jednoho neutronu na elektron a proton.



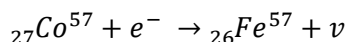


Obrázek 1.2 Vznik beta minus částice [20]

- Radioaktivita  $\beta^+$  naopak emituje antičástici k elektronu a tou je pozitron  $e^+$ . Vyskytuje se u radionuklidů, které mají více protonů než neutronů. Pozitron vzniká v jádře přeměnou protonu na neutron a pozitron. Neutron setrvává v jádře, pozitron je vysokou rychlostí vyzářen ven z jádra, čímž dojde k postupnému vyrovnání neutronů a protonů v jádře. Příkladem může být přeměna uhlíku na bór:



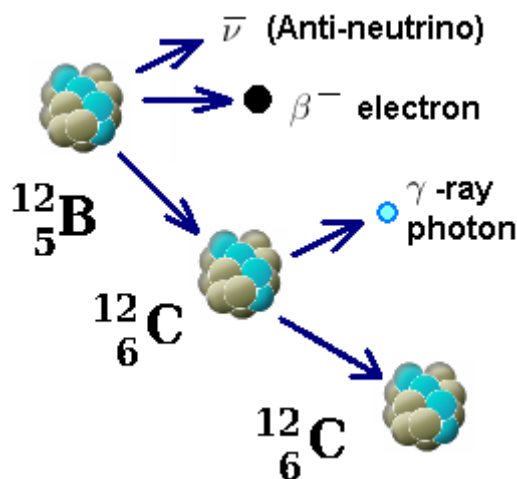
- Elektronový záchyt neboli inverzní beta-rozpad je posledním druhem radioaktivity  $\beta$ . Stejně jako u záření  $\beta^+$  se proton mění na neutron, ovšem odlišnou metodou. Proton se sloučí elektronem, který obíhá kolem jádra, čímž vznikne neutron. Na prázdné místo okamžitě přeskočí jiný elektron za vyzáření charakteristického záření X. Jako příklad elektronového záchytu je uvedena přeměna kobaltu na železo:



Vzájemnou přeměnou protonů a neutronů, tedy při radioaktivitě  $\beta$ , dochází také ke vzniku mikročástice neutrina. Spolu s fotony je neutrino nejčastěji vyskytující se částice ve vesmíru. Tato částice nemá elektrický náboj a téměř neinteraguje s látkou. Jejich vznik můžeme pozorovat ve vesmíru, v jaderných reaktorech, nebo při rozpadu přírodních radionuklidů.

Po radioaktivní přeměně, při které byla vyzářena částice  $\alpha$  nebo  $\beta$  vzniká obvykle dceřiné jádro v energeticky excitovaném stavu, při kterém jsou od sebe nukleony vzdálenější než za normálního stavu a obsahují vyšší energetické hladiny. Nukleony se zpravidla seskupují do nižšího energetického stavu a dojde k deexcitaci. Vzniklý energetický rozdíl je vyzářen ve formě tvrdého elektromagnetického záření  $\gamma$ . Nemá žádný elektrický náboj, paprsek je tvořen fotony. Tím se jádro energeticky stabilizuje a dceřiná buňka dále setrvává v základním stavu. Toto záření je pro člověka nejnebezpečnější. Je vysoce pronikavé, zastaví ho pouze silná vrstva olova nebo

jiného kovu. Jako příklad je uvedena rovnice vyjadřující vznik záření  $\gamma$  v jádru dceřiné buňce uhlíku po vyzáření částice  $\beta$  z jádra mateřské buňky boru [1].



Obrázek 1.3 - Vzniku záření gama [3].

Na obrázku 1.3 můžeme vidět emitovanou částici  $\beta$  spolu s mikročásticí neutrina z mateřské buňky bóru. Ten se mění na energicky deexcitovaný uhlík. Při vyrovnávání energetických hladin jádra deexcitovaného uhlíku dochází k vyzáření tvrdého elektromagnetického záření  $\gamma$  – fotonu.

## 1.1 Zdroje záření

Celá Země je přirozeně radioaktivní. Radionuklidy se nachází ve vzduchu, půdě, vodě, potravinách i v našich tělech a další vznikají interakcí kosmického záření s atmosférou. Na Zemi se nacházejí radionuklidy primární (primordiální), druhotné (sekundární) a kosmogenní. Především se zde vyskytují radioizotopy s dlouhým poločasem rozpadu v řádu stovek miliónů let. Největší množství krátkodobých izotopů zastupují ty skupiny, které se neustále vytváří interakcí vesmírného záření a atmosféry, nebo rozpadem dlouhodobých radioizotopů. Některé radioizotopy nacházející se na Zemi si člověk vyrábí uměle. Na planetě Zemi se taktéž nachází množství již vyhaslých radionuklidů, mezi které můžeme zařadit např. jód  $^{129}\text{I}$ , hliník  $^{26}\text{Al}$ , a železo  $^{60}\text{Fe}$  [4].

### 1.1.1 Primární přírodní radionuklidy

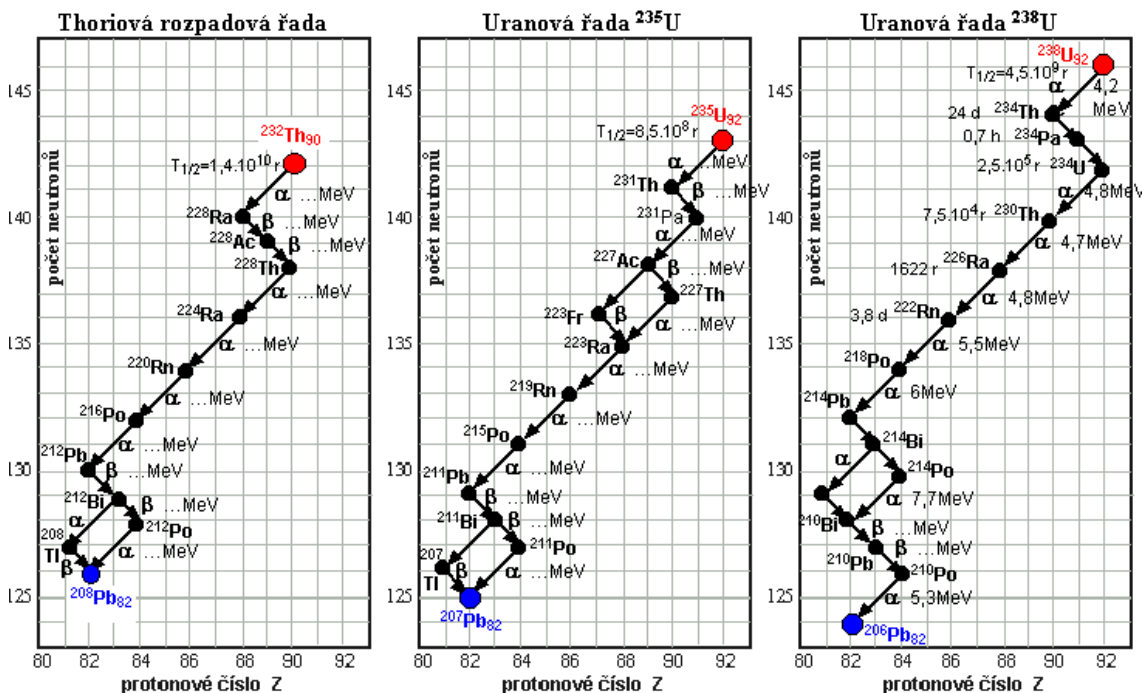
Primární neboli primordiální radionuklidy vznikaly termonukleárními reakcemi v nitrech hvězd. Hvězdy poté explodovaly jako supernovy z jejichž prachu následně vznikla celá sluneční soustava. Do dnešní doby (tj. 4-5 miliard let po vzniku Sluneční soustavy) se zachovaly pouze ty s poločasem rozpadu větším než  $10^8$  let. Nejhojněji se zde vyskytuje draslík  $^{40}\text{K}$ , který zaujímá  $3 \cdot 10^{-3} \%$  zemské kůry a jeho hmotnostní aktivita v půdě se pohybuje mezi 70 až 1800 Bq/kg.

Draslík  $^{40}\text{K}$  se vyznačuje poločasem rozpadu až  $1,27 \cdot 10^9$  let.  $8\text{--}12 \cdot 10^{-6} \%$  zemské kůry představuje thorium  $^{232}\text{Th}$ , jehož poločas rozpadu činí  $1,39 \cdot 10^{10}$  let.

Nejvýznamnějším primordiálním radionuklidem je uran  $^{238}\text{U}$ , jehož zastoupení v zemské kůře činí  $2\text{--}4 \cdot 10^{-6} \%$ ,  $T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$  let, a uran  $^{235}\text{U}$  ( $2\text{--}3 \cdot 10^{-8} \%$ ,  $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$  let). Oba radioizotopy se alfa-rozpadem štěpí do dvou odlišných uranových rozpadových řad. Jeden z významnějších radioizotopů, který se nachází v rozpadové řadě uranu  $^{238}\text{U}$  je radium  $^{226}\text{Ra}$ , jehož hmotnostní aktivita v půdě je 1-1000 Bg/kg [4].

### 1.1.2 Druhotné přírodní radionuklidy

Druhotné radionuklidy jsou produkty primárních radionuklidů. Rozpadem primordiálních radionuklidů vzniká velké množství radionuklidů druhotných. Vytváření radioaktivní rozpadové řady vyzařující  $\alpha$  i  $\beta$  záření, excitovaná jádra i záření  $\gamma$ . Rozpadové řady existují v přírodě celkem tři viz. níže Obrázek 1.4. Na obrázku 1.4 můžeme zhruba v polovině všech tří řad pozorovat radioaktivní plyn radon, kterým se budeme v dalších částech práce zabývat důkladněji [4].



Obrázek 1.4 Přírodní rozpadové řady [4]

### 1.1.3 Kosmogenní radionuklidy

Kosmogenní radionuklidy neustále vznikají jadernými reakcemi, ke kterým dochází při průchodu vysokoenergetického kosmického záření atmosférou země. Nejvyšší zastoupení má radiouhlík  $^{14}\text{C}$  a tritium  $^3\text{H}$ , ostatní radionuklidy vznikají ve velmi malých množstvích [4].

Tabulka 1 Kosmogenní nuklidy vznikající v atmosféře [4].

Nuklid	Symbol	Poločas rozpadu	Přírodní aktivita
Uhlík 14	$^{14}\text{C}$	5730 let	0,22 Bq/kg
Tritium	$^3\text{H}$	12,3 let	$1,2 \cdot 10^{-3}$ Bq/kg
Beryllium 7	$^7\text{Be}$	53,28 dní	0,01 Bq/kg

#### 1.1.4 Radioaktivní pozadí

V současné době se široká veřejnost obává veškeré radiace, které je vystavena, zejména ozáření umělými zdroji záření, přestože největší dávku záření obdrží organismus člověka přírodním radioaktivním pozadím. Navíc je potřeba si uvědomit, že každý objekt či živočich na planetě je taktéž radioaktivní. Lidské tělo obsahuje přibližně 30 mg draslíku  $^{40}\text{K}$  a 10 ng uhlíku  $^{14}\text{C}$ .

Prvek, která se nejvýznamněji podílí na radioaktivním pozadí je radioaktivní plyn radon, který se uvolňuje ze zemské kůry a přeměňuje se na jiné radioizotopy. Radon při rozpadu vyzařuje  $\alpha$  částice a vznikají dalších radionuklidy. Radon a prvky z něj vzniklé se vážou na prachové a ostatní částice, které mohou po vdechnutí poškodit nechráněnou plicní tkáň. V České Republice se roční dávka způsobená radonem pohybuje okolo 3,2 mSv, což tvoří asi 59 % celkového ozáření průměrného jedince. V místech se zvýšeným výskytem radonu až 10 mSv za rok.

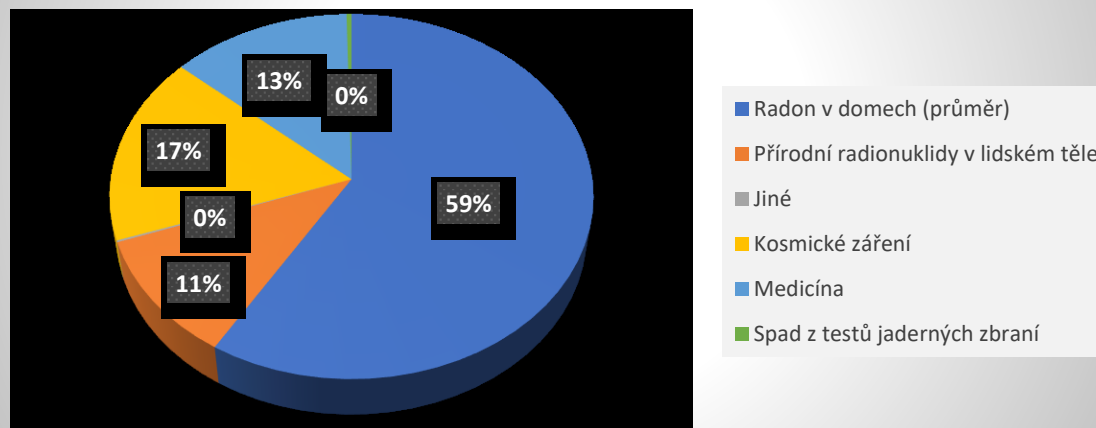
Na radioaktivním pozadí se taktéž podílí radioaktivní horniny. Ať už jejich přírodní radioaktivitou, nebo jejich uvolňováním do podzemních vod. Radionuklidy můžeme nalézt také v povrchových vodách, ovšem v mnohem nižším množství než ve vodách podzemních.

Radionuklidy se dostávají také do rostlin, například pomocí kořenového přestupu nebo při depozici ze vzduchu na její povrch. Z rostlin se pak dále přenáší na hospodářské zvířata, čímž jsou obsaženy i v mase či mléce.

Úroveň radiace je v různých lokalitách na Zemi rozdílná. Ve vyšší nadmořské výšce je radioaktivita vyšší kvůli vyššímu podílu kosmického záření. Oblasti s vyšší úrovní, než je světový průměr jsou například Guarapari v Brazílii, Kérala v Indii, nebo Flinders Ranges v Austrálii.

Oblast, která se z hlediska obdrženého ročního dávkového ekvivalentu úplně vymyká je Ramsar v Iránu. Pramení zde minerální horské vody s vysokým obsahem radia  $^{226}\text{Ra}$ . Obyvatelé Ramsaru obdrží ročně dávkový ekvivalent až 260 mSv, což je až 200násobně silnější radioaktivní pozadí, než je obvyklé. Podrobným zkoumáním zdravotního stavu obyvatel Ramsaru se ovšem zjistilo, že celoživotní vystavení takto vysoké radioaktivitě nemělo žádné negativní zdravotní účinky. Oblast je dokonce díky svým radioaktivním pramenům proslavena jako lázeňský distrikt [5, 6].

## Rozdělení zdrojů ozáření pro průměrného obyvatele světa



*Graf 1 Graf popisující rozdělení zdrojů ozáření průměrného člověka [5]*

Výsledky výzkumu jsou tedy v rozporu s dosavadními modely, které posuzují radioaktivní prostředí. Naopak je vhodná dávka radiace zdraví prospěšná. Některé teorie tvrdí, že malá úroveň radiace působící na člověka je nezbytná pro vytvoření imunity pro případ, že by se úroveň těchto vlivů znatelně zvýšila.

Se zvýšenou dávkou se potýkají také například účastníci letů dopravními letadly. Ve výšce 10 km nad povrchem země se setkáváme se silným zářením vznikajícím bombardováním atmosféry kosmickými vysokoenergetickými paprsky. Účastníci těchto letů obdrží v průměru 2,2 mSv za rok. Menší množství záření X a  $\gamma$  může vznikat při atmosférických výbojích, tedy blescích.

Hodnoty přírodní radiace v České republice jsou poměrně nízké, pohybují se v hodnotách od 0,070  $\mu\text{Sv/h}$  do 0,270  $\mu\text{Sv/h}$  [5, 6]. Pro představu je níže v Tabulce 2 uvedena radioaktivita běžných věcí a osoby v porovnání s primárním a umělým zdrojem ionizujícího záření.

*Tabulka 2 – Radioaktivita vybraných materiálů [5]*

1 kg kávy	1000 Bq
1 kg uhelného popílku	2000 Bq
1 kg superfosfátového hnojiva	5000 Bq
1 dospělý člověk	7000 Bq
Vzduch v průměrném Evropském domě	až 30 000 Bq
Zářič pro lékařskou diagnostiku	70 TBq
1 kg uranu	25 TBq

#### 1.1.4.1 Radon

Radon  $^{222}\text{Rn}$  a jeho produkty záření jsou z hlediska vnitřního ozáření člověka zcela dominantní. Radon je přírodní plyn vznikající postupnou přeměnou uranu. Poločas rozpadu radonu činí pouhé 4 dny, poté se rozpadá na další radioaktivní produkty. Obvyklé hodnoty objemové aktivity radonu v půdním vzduchu do 1 metru pod zemí se pohybují mezi 1 až 100 kBq/m<sup>3</sup>, v některých extrémních případech až 1000 kBq/m<sup>3</sup>.

Plynný radon se z půdního vzduchu uvolňuje do atmosféry a koncentruje se v budovách. V České republice činí průměrná hodnota objemové aktivity radonu v budovách cca 118 Bq/m<sup>3</sup>, čímž se řadíme mezi země s nejvyšší koncentrací radonu. Ve venkovní atmosféře se tato hodnota pohybuje kolem 5 Bq/m<sup>3</sup>.

Tento radioaktivní plyn se při dýchání koncentruje v plicích a poškozuje plicní buňky. Takovéto poškození plicních buněk může vést až k rakovině plic. Radon je po kouření druhá nejvýznamnější příčina vzniku rakoviny plic. Při zvýšení koncentrace radonu o 100 Bq/m<sup>3</sup> se zvyšuje šance vzniku rakoviny plic až o 16 %.

Negativní vliv radonu na zdraví potvrzuje například česká epidemiologická studie, která proběhla ve Středočeském plutonu – oblast s nejvyšší koncentrací radonu v ČR. Na pozorované skupině lidí se prokázal o 13% vyšší výskyt rakoviny plic. Zvýšený výskyt byl pozorován hlavně u osob v jejichž obydlí se nacházela koncentrace radonu vyšší než 400 Bq/m<sup>3</sup>. V roce 2009 uznala Světová zdravotnická organizace (WHO) radon jako zdravotní hrozbu a doporučila státům, aby jí věnovaly patřičnou pozornost [6].

#### 1.1.5 Umělé zdroje záření

S umělými zdroji ionizujícího záření se běžně setkáváme. Jsou jimi například urychlovače částic ve zdravotnických diagnostických nebo terapeutických přístrojích. Malou dávku ionizujícího záření mohou produkovat také technické spotřební předměty, jako třeba monitory a obrazovky nebo předměty obsahující radioaktivní látky, jako jsou například požární hlásiče.

Jeden z významných umělých producentů radiace jsou uhelné elektrárny. Spalováním uhlí a jiných fosilních paliv se uvolňují příměsi uranu a thoria a spolu s radiem, radonem a poloniem vstupují do atmosféry. Popílek z uhelných elektráren je také radioaktivní. Člověk žijící 80 km daleko od takové elektrárny obdrží dodatečný dávkový ekvivalent cca 0,3 μSv ročně. Pro porovnání, člověk žijící ve stejné vzdálenosti od jaderné elektrárny by obdržel pouze 0,09 μSv ročně. V těsné blízkosti jaderných elektráren už jsou autorizované limity výpustí vyšší. Limit pro Temelín činí 46 μSv a 43 μSv pro Dukovany.

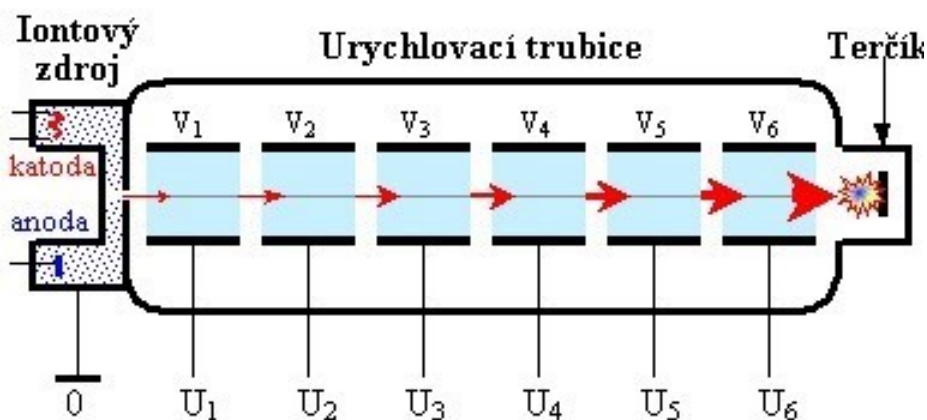
Nejhojněji se umělé zdroje ionizujícího záření používají ve zdravotnictví k terapeutickým nebo diagnostickým účelům. Především se využívá záření X v rentgenové diagnostice, významné je také záření γ, které se používá při radioterapiích. Ionizující záření produkují především urychlovače částic, tedy cyklotron a synchrotron, případně lineární urychlovače, mezi které patří rentgenka [6, 7].

Využití našly radioaktivní zdroje i v podobě luminiscenčních nátěrů na ručičkách hodinek. Na prvních typech hodinek se používala radiová barva smíchaná s fosforem. Tato barva emitovala, na rozdíl od fosforu, světlo i bez předešlého vystavení vnějšímu světelnému zdroji. Radium se rozpadalo na plynný radon a produkovalo hlavně radioaktivitu  $\alpha$  v menším množství i radioaktivitu  $\gamma$ . Jelikož je radium nestabilní prvek z jeho rozpadových prvků bylo emitováno i záření  $\beta$ . Poločas radia užívaného na ručičkách hodinek je 1 602 let. Nátěr se objevoval například na hodinkách Rolex GMT Master nebo Panerai Radomir. Kvůli vysokého zdravotního rizika se později začaly vyhledávat potenciálně méně zdraví ohrožující nátěry a přešlo se na používání 147 promethia s poločasem rozpadu 2,62 let a tritia s poločasem rozpadu 12,32 let. Oba prvky emitují záření  $\beta$  [15].

#### 1.1.5.1 Lineární urychlovač

Lineární urychlovač (zkráceně Linac) urychluje působením elektrického pole nabitě částice po přímé dráze. Existují dva základní typy – elektrostatický a vysokofrekvenční.

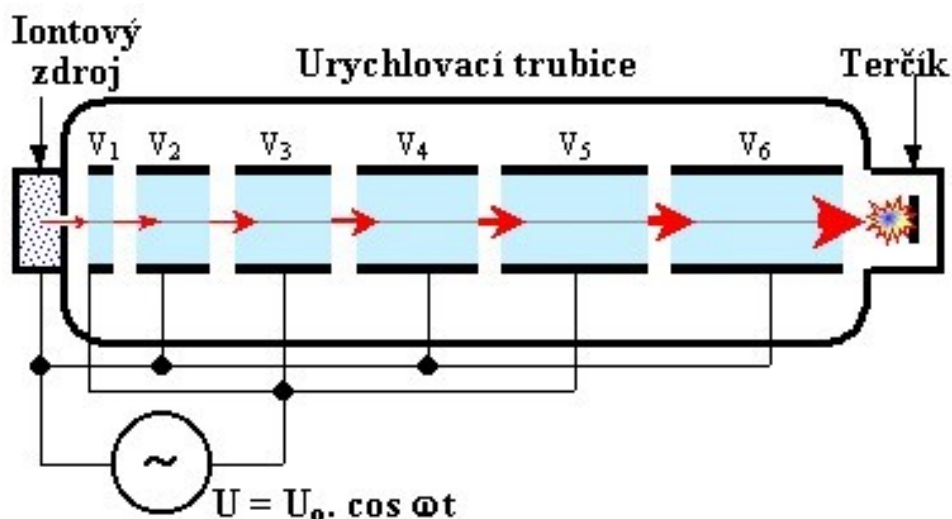
Elektrostatický lineární urychlovač se skládá z několika kovových válcových elektrod, mezi kterými je rozloženo postupně vzrůstající napětí. Mezi tyto elektrody vstupuje částice z iontového zdroje a je urychlována energií přímo úměrnou součtu napětí na jednotlivých válcových elektrodách. Mezi elektrodami je mezera, která na urychlované částice působí jako čočka – fokusuje proud do úzkého svazku. Fokusevaný svazek pak dopadá na terčik. Elektrostatický lineární urychlovač je napájen buď kaskádním násobičem nebo Van de Graffovým generátorem o napětích od stovek kilovoltů po 5 MV.



Obrázek 1.5 Schéma elektrostatického lineárního urychlovače [12]

Vysokofrekvenční lineární urychlovač je efektivnější možností urychlení nabitých částic po přímkové dráze. Tento typ urychlovače nepotřebuje ke své funkci extrémně vysoké napětí. Stejně jako urychlovač elektrostatický se i vysokofrekvenční varianta skládá z množství válcových elektrod, ty jsou ovšem připojeny ke zdroji střídavého napětí, sudé válce k jednomu pólu, liché k druhému a iontového zdroje, který je připojen ke stejnému pólu jako sudé válcové elektrody. Pokud má první elektroda záporný potenciál, kladná částice jí projde skrz do mezery

mezi první a druhou elektrodou. V následující fázi se změnila polarita první elektrody na kladný potenciál a druhé na záporný. Tím dojde k urychlení kladné částice a současně k jejímu přesunu do mezery mezi druhou a třetí válcovou elektrodou. Frekvence tedy musí být synchronizována tak, aby ke změnám polarity docházelo vždy při průchodu částice mezerou mezi jednotlivými elektrodami. Urychlená částice dopadá na terčik a vzniká ionizující záření [12].



Obrázek 1.6 Schéma vysokofrekvenčního lineárního urychlovače [12]

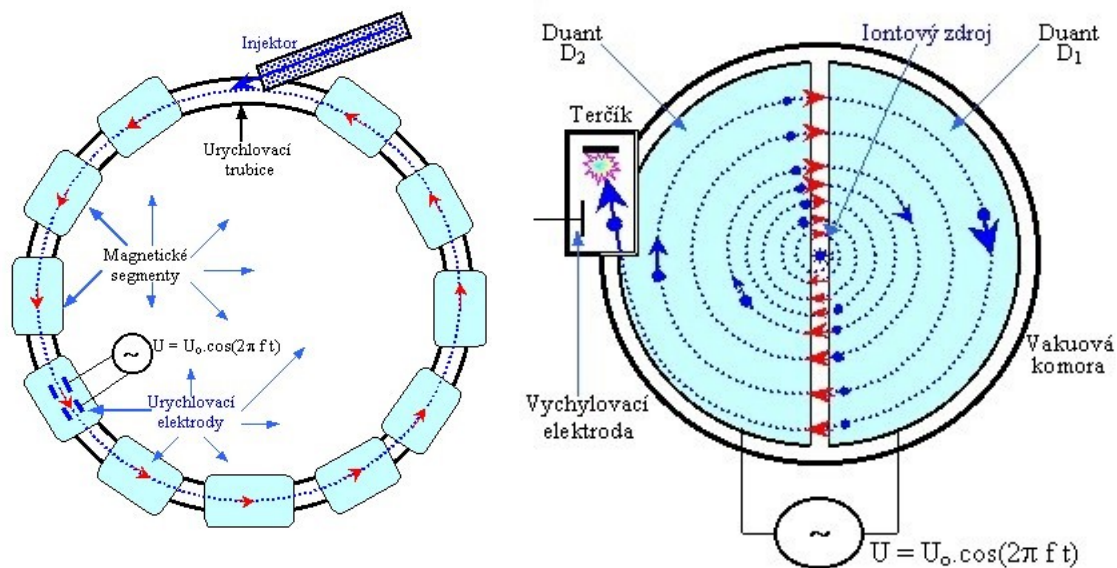
#### 1.1.5.2 Kruhový urychlovač

Kruhový urychlovač urychluje nabitě částice na vysoké energie tím, že je mnohonásobně urychlí elektrickým polem, do kterého jsou opakovaně vráceny za pomoci magnetického pole. Dva základní typy kruhového urychlovače jsou cyklotron a synchrotron.

Základní část cyklotronu jsou dva duté poloválce (duanty), které jsou připojeny ke zdroji střídavého napětí a umístěny v ploché vakuové komoře. Mezi duanty se nachází urychlovací mezera a v ní střídavé elektrické pole. Ve středu urychlovací mezery je iontový zdroj, ze kterého je vysílána elektricky nabitá částice. Elektrickou silou je částice vtažena do dutého poloválce s opačnou polaritou, než je náboj částice a opíše v něm půlkružnici. Částice se dále dostává do urychlovací mezery a polarita duantů se změní. Částice znovu opisuje půlkružnici ovšem s postupně se zvyšujícím poloměrem a rychlostí do té doby, než se dostane do dráhy o maximálním poloměru a naráží na terčik.

Synchrotron se využívá pro urychlování částic na velmi vysoké energie. Pro urychlení využívá vakuové trubice stočené do kruhu o průměru stovek metrů až několika kilometrů. Trubice je obklopena velkým množstvím dipólových elektromagnetů, které udržují částice na orbitě. Synchrotron urychluje částice již urychlené jiným kruhovým nebo lineárním urychlovačem. Samotné urychlování je provedeno pomocí velkého množství urychlovacích elektrod, které jsou napájeny střídavým napětím, jehož frekvence je modulována podle rychlosti urychlované částice [12].

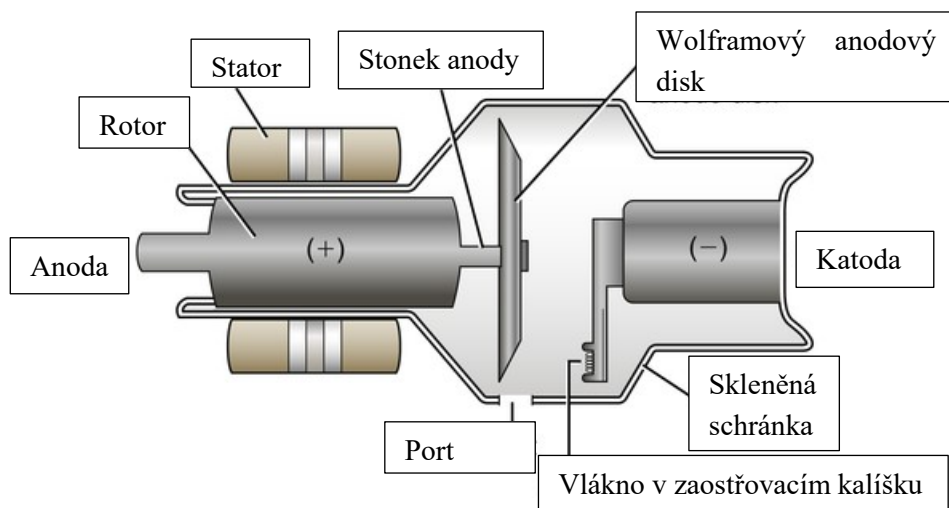




Obrázek 1.7 Vlevo synchrotron, vpravo cyklotron [12]

#### 1.1.5.3 Rentgenka

Rentgenka je vakuová elektronka produkující záření X. Skládá se z katody a anody, které jsou připojené do obvodu s napětím 20-200 kV. Vysoké napětí rozžhavlí katodu, ta emituje elektrony, které jsou přitahovány anodou. Elektrony jsou elektrickým polem urychlovány, čímž získají vysokou kinetickou energii. Po dopadu elektronu na anodu dojde k jeho prudkému zabrzdění. Přebytková kinetická energie je vyzářena v podobě tvrdého elektromagnetického záření, tedy záření X dvojího druhu – brzděné a charakteristické záření.



Obrázek 1.8 Schéma rentgenky [21]

Brzděné záření obsahuje záření všech vlnových délek a vzniká právě při zabrzdění elektronu na anodě. Charakteristické záření vzniká, pokud elektron dopadající na anodu vyrazí

elektron obíhající kolem atomu, na který dopadá. Elektronová díra je okamžitě nahrazena elektronem z jiné vrstvy za vyzáření fotonu rentgenového záření [8, 9].

#### 1.1.5.4 Anihilace elektron – pozitron

K anihilaci dochází při srážce elektronu a jeho antičástice pozitronu, které se změně na záření gama. Tohoto jevu se využívá při zobrazovací metodě PET.

## 1.2 Veličiny a jednotky

### 1.2.1 Aktivita

Množství radioaktivní látky popisujeme aktivitou. Tato veličina nám popisuje počet radioaktivních přeměn v látce za určitou jednotku času. Jednotkou aktivity je 1 Bq – jeden Becquerel s rozměrem  $s^{-1}$ . Můžeme se setkávat také se zastaralou jednotkou aktivity 1 Ci, která odpovídala  $1g^{226}\text{Ra}$ . Mezi těmito jednotkami platí převodní vztah:

$$1 \text{ Ci} = 3,7E + 10 \text{ Bq}$$

Uvážíme-li také jednotkovou hmotnost zářiče, dostaneme hmotnostní aktivitu – jednotka [Bg/kg]. Jedná-li se o plošný zdroj, vztahujeme aktivitu na jednotkovou plochu. Používáme tedy jednotku [Bg/m<sup>2</sup>]. U objemových zdrojů, jako jsou například zdroje plyné či kapalně, využíváme jednotek [Bg/m<sup>3</sup>] nebo [Bg/l]. Pro radon se objevuje specifická jednotka OAR (objemová aktivita radonu), nebo zastaralá jednotka EOAR, která zohledňovala i negativní účinky dceřiných produktů radonu. V současnosti již se nepoužívá.

### 1.2.2 Dávka

Dávka popisuje poměr střední energie dE, který je předán ionizujícím zářením látce o určité hmotnosti dm. Dávka je přímo úměrná střední energii dE a nepřímo úměrná hmotnosti látky dm, z čehož plyne vztah:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

„Absorbovaná dávka je energie absorbovaná v jednotce hmotnosti ozařované látky v určitém místě.“ Jednotkou této veličiny je 1 Gy – jeden Gray s rozměrem [J/kg]. Ve starší literatuře se můžeme setkat s dřívější jednotkou 1 rad. Mezi radem a Gy platí převodní vztah:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

Z dávky se dále odvíjí dávkový příkon. Dávkový příkon popisuje přírůstek dávky za jednotku času. Základní jednotkou je [Gy/s], obvykle se ovšem používají menší jednotky [μGy/h].

### 1.2.3 Expozice

Expozice je definována jako poměr:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

„Kde  $dQ$  je absolutní hodnota celkového elektrického náboje iontu jednoho znaménka vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny v objemovém elementu vzduchu o hmotnosti  $dm$ .“

Jednotka expozice je C/kg – coulomb/kg. Starší jednotkou byl 1 rentgen – R.

$$1 R = 258E - 6 C/kg$$

Přírůstek expozice za určitou jednotku času se nazývá expoziční výkon. Jednotkou je [C/kg.s] nebo [A/kg].

$$1 R = 10 mGy/h$$

Veličina se v dozimetrické praxi postupně nahrazuje kermou ve vzduchu nebo ve tkáni.

#### 1.2.4 Kerma

Kerma je popsána vztahem:

$$K = dE_k/dm$$

„Kde  $dE_k$  značí součet počátečních kinetických energií všech nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v uvažovaném objemu látky o hmotnosti  $dm$ . Jednotka je tak jako u absorbované dávky 1 Gy.“

Tato veličina se využívá v souvislosti s nepřímou ionizujícím zářením. Kerma je rovná absorbované dávce za podmínky rovnováhy nabitých částic.

Přírůstek kerry za jednotku času se nazývá kermový příkon, jehož jednotka je [Gy/s].

#### 1.2.5 Jakostní faktor

„Jakostní faktor je modifikující faktor závažnosti absorbované dávky podle biologické účinnosti nabitých částic, způsobujících tuhle dávku.“

Tabulka 3 – Používané hodnoty jakostního faktoru

Druh nabité částice/záření	Jakostní faktor
Záření X, gama a elektrony	$Q = 1$
Neutrony o neznámém energetickém spektru	$Q = 10$
Částice s jedním nábojem o neznámé energii a klidové hmotnosti větší než 1 atomová hmotnostní jednotka	$Q = 10$
Částice alfa a další vícenásobně nabitě částice o neznámé energii	$Q = 20$
Tepelné neutrony	$Q = 2,3$

Hodnoty byly odvozeny tak, aby odpovídaly hodnotám biologické účinnosti. Zároveň musí být nezávislé na orgánu, tkáni i druhu uvažovaného biologického účinku.

### 1.2.6 Ekvivalentní dávka

Ekvivalentní dávka je přímo úměrná velikosti absorbované dávky  $D$ , jakostnímu faktoru  $Q$  a součinu ostatních modifikujících faktorů  $N$ . Její základní jednotkou je sievert – Sv, reálně se však používají hlavně jednotky nižší, jako jsou mSv a  $\mu$ Sv. Již zastaralou jednotkou ekvivalentní dávky je 1 rem, kdy 1 rem = 1 Sv.

$$H = D * Q * N$$

Ekvivalentní dávka se používá pro vyhodnocení radiační zátěže v oblasti radiačních limitů. Nelze jí použít k určení pravděpodobných následků z ozáření při nehodách, jelikož nereprezentuje účinky ionizujícího záření na člověka při velkých absorbovaných dávkách. Jeden Sievert jakéhokoliv záření má stejný biologický vliv na organismus jako 1 Gy gama nebo rentgenového záření.

Podíl přírůstků ekvivalentní dávky  $dH$  v časovém intervalu  $dt$  a tohoto časového intervalu se nazývá příkon ekvivalentní dávky. Jeho hodnotu popisujeme jednotkou [Sv/s].

Chceme-li měřit součet dávkových ekvivalentů různých druhů záření v hloubce 10 mm pod povrchem těla, užívá se individuální hloubkový dávkový ekvivalent  $H_p$ . Měří se obvykle dozimetrem, který je pokryt materiálem vykazujícím stejné účinky jako povrch tkáně.

Další variantou zmíněné veličiny je individuální povrchová dávkový ekvivalent, jež je definován jako součet dávkových ekvivalentů různých druhů záření ve tkáni v hloubce 0,07 mm pod povrchem těla. Taktéž se měří dozimetrem pokrytým patřičným materiálem.

Kolektivní dávkový popisuje součet efektivních dávkových ekvivalentů jedinců z vybrané populace. Používá se jednotka sievert [Sv], avšak můžeme se setkat i s nesprávně používanou jednotkou [manSv] [10].

## 1.3 Limity ozáření

Obecný limit ozáření obyvatelstva je maximálně 1000  $\mu$ Sv/rok. Do této hodnoty se nezahrnuje lékařské ozáření a ozáření způsobené přírodními zdroji. Limit pro radiační pracovníky je až 50i násobně vyšší, tedy 50 000  $\mu$ Sv/rok, případně 100 000  $\mu$ Sv za 5 let.

Pro obsah radonu ve stávajících a nových budovách udává vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. směrné hodnoty:

- Ve stávajících budovách by průměrná hodnota objemové aktivity radonu neměla překračovat 400 Bq/m<sup>3</sup>,
- v nových domech by měla být průměrná hodnota objemové aktivity radonu menší než 200 Bq/m<sup>3</sup>.

V domech, které jsou používány pro vlastní bydlení není možné předepsat limit, proto se využívají směrné hodnoty, které majitele pouze informují o případných vysokých hodnotách [6].

Při radioterapii se obvykle dávka rozděluje na velikosti 1,8-2 Gy týdně, kdy 1 Gy rentgenového nebo gama záření má stejné účinky jako dávka jakéhokoli záření o hodnotě 1 Sv [13].

## 1.4 Radiorezistence a radiorezistivita

Radiorezistence, tedy odolnost buněk vůči ionizujícímu záření nebo radiosenzitivita, citlivost buněk na ionizující záření, závisí především na reparační schopnosti buněk. Reparační schopnost buněk je závislá na fázi buněčného cyklu, stupni diferenciaci buňky a objemu vody a kyslíku v buňce. Liší se citlivost jednotlivých druhů tkání a buněk je důležité uvážit při léčbě zářením, a také z hlediska radiační ochrany.

Při zasažení zářením v pozdní fázi růstu a ve fázi kdy se buňka připravuje na mitózu je buňka nejsenzitivnější. Méně senzitivní je pak v období jaderného dělení a při přechodu z růstové fáze do fáze syntézy DNA. Nejmenší citlivost má pak v klidové fázi. Ozářením buňky v citlivé fázi může dojít k zastavení její fáze nebo změně informací a následným mutacím.

Radiorezistentní jsou tedy hlavně dobře diferencované buňky, které nejsou neustále obnovovány. Tyto buňky se dělí minimálně a většinu času setrvávají v růstovém nebo dokonce klidovém stádiu. Jsou to buňky nervové, svalové a vazivové. Permanentně obnovující se tkáně jsou naopak vysoce radiosenzitivní. Zde patří lymfatická tkáň, kostní dřeň nebo epitel.

Při ozáření těla ionizujícím zářením vznikají v těle volné kyslíkové radikály, které způsobují poškozené tkáně. Z tohoto důvodu jsou buňky bohaté na kyslík vysoce radiosenzitivní, naopak buňky hypoxické jsou radiorezistentní. Příklad radiorezistentní tkáně jsou nádorové buňky, které z důvodu chaotického uspořádání a nedostatečného prokrvování neobsahují dostatek kyslíku [7, 11].

## 1.5 Účinky ionizujícího záření na organismus

Účinky ionizujícího záření se v organismu projevují ve čtyřech základních stádiích. Nejprve nastává stádium fyzikální, kdy záření interaguje s hmotou a předává tak svou energii zejména orbitálním elektronům za vzniku ionizace a excitace. Ionizace a excitace narušují chemické vazby molekul a atomů, čímž vznikají fyzikálně-chemické reakce iontů s molekulami, mající za následek disociace molekul a vznik volných radikálů. Fyzikální i fyzikálně-chemická stadia probíhají velmi rychle, netrvají déle než  $10^{-10}$  sekund. Následuje stádium chemické, trvající od tisícín sekundy do několika sekund. Ionty a radikály vzniklé v předešlé fázi reagují s organickými molekulami, jako jsou molekuly DNA, RNA, proteiny a enzymy a mění jejich funkci a složení. Exemplární případ je zlom řetězců molekul DNA, poškození pyrimidinových a purinových bází nebo lokální denaturace. Dále nastává stádium biologické. Změny z molekulárního hlediska vyúsťují ve funkční a morfologické změny v buňkách, orgánech či dokonce i v organismu jako v celku. Doba trvání biologického stadia souvisí se složitostí

biochemických a metabolických pochodů nebo s působením řady mechanismů zpětné vazby, mnohdy dosahuje i několik desítek let.

Na fyzikálních parametrech záření jsou závislé stádia fyzikální a chemické, biologické stádium je již ovlivněno jen vlastnostmi určitých buněk. Z výše popsaných stádií vznikají tři základní účinky: deterministický, stochastický nebo žádný. Dojde-li poškozením DNA ke smrti buněk, jež nejsou tělem nahrazeny, hovoříme o deterministických účincích. Stochastické účinky nastávají po imunitními mechanismy nezvládnuté mutaci. Žádné účinky se nedostaví, pokud reparační mechanismy buňky včas napraví poškozené DNA, pokud se imunitní mechanismus organismu včas vypořádá s mutací buněk nebo pokud jsou volné radikály včasně chemicky rekombinovány [14].

#### **1.5.1 Stochastické účinky**

Organismus je schopen se při malé obdržené dávce sám vypořádat, pomocí reparačních procesů, s většinou poškození biologických aktivních látek. I při nízkých dávkách jsme si vědomi pravděpodobnosti, že se oprava některých poškození nemusí zdařit, případně dojde k chybě. Dochází ke genové nestabilitě a její vyústění v mutaci. Dělením zmutovaných buněk mohou vzniknout pozdní následky genetické nebo nádorové povahy. Stochastické účinky jsou zcela individuální a náhodné, nelze je tedy předvídat. Jejich výskyt můžeme určit pouze pravděpodobnostně. Stochastické účinky nezávisí na výši dávky, na absorbované dávce závisí jedině pravděpodobnost jejich výskytu [14].

#### **1.5.2 Deterministické účinky**

Po dosažení prahové dávky se dostávají deterministické účinky. Rostoucí dávka je přímo úměrná pravděpodobnosti vzniku poškození tkáně a zároveň zvyšuje jeho závažnost. V ozáření tkáni dochází ke snížení počtu buněk a vyplavení toxických látek. Tyto účinky jsou předvídatelné. Stochastické i deterministické účinky záření obvykle probíhají současně a často je od sebe není možné striktně oddělit [14].

#### **1.5.3 Volné radikály**

Jak již bylo zmíněno, biologické účinky ionizujícího záření vznikají v důsledku fyzikálních a chemických interakcí ionizujícího záření s organismem, tělem, buňkami a atomy, ze kterých je organismus složen. Jedním z nejsignifikantnějších účinků ionizujícího záření je právě vznik volných radikálů.

Volné radikály jsou atomy a molekuly, které obsahují na poslední orbitě jeden či více nespárovaných elektronů. Taková částice se pak stává velmi nestabilní a reaktivní. Získáním elektronu do páru z jiných molekul se snaží dostat do rovnovážného stavu, čímž z molekuly, ze které si elektron přebrala může vytvořit další volný radikál. Volné radikály mají oxidační a redukční vlastnosti, díky kterým jsou schopny štěpit vnitřní molekulární vazby a degradovat tím jejich strukturu, nezbytnou pro biologické funkce. Jejich působením v organismu může docházet k lipoperoxidaci tuku, oxidaci bílkovin, glykaci bílkovin s glukózou nebo změny v řetězci DNA a RNA, které mohou následně způsobit smrt a mutace buněk [14].

### 1.5.4 Účinek na DNA

Při působení ionizujícího záření na buňku se deoxyribonukleová kyselina stává dominantním terčem. Vlivem záření může docházet ke zlomům cukro-fosfátového řetězce nebo k chybnému řazení aminokyselin. K jednoduchému zlomu DNA je poškozeno jedno vlákno. Jedno poškozené vlákno je buňky schopna obnovit pomocí enzymu DNA ligáza. Dojde-li ke dvojitému zlomu, tedy k poškození obou vláken, je pokus buňky o opravu často neúspěšný a buňka zaniká [14].

### 1.5.5 Malé dávky záření

Základní východisko současné radiační ochrany: „Každé ozáření zdravé živé tkáně ionizujícím zářením, a to i velmi malou dávkou, může být pro organismus potenciálně nebezpečné svými pozdními stochastickými účinky. Proto je nutno všemi dosažitelnými prostředky snížit dávky záření na minimum.“ Toto tvrzení v podstatě hovoří o tom, že stochastické záření nemá na rozdíl od deterministického záření prahovou hodnotu. Toto tvrzení je všeobecně uznávané, ovšem není prokázané. Pečlivým zkoumáním nashromážděných dat o vztazích biologických účinků a dávek se ukazuje, že jejich vzájemná závislost není lineární, tudíž nemusí být dosud uznávaná aproximace vlivu stochastických účinků v lineární bezprahové teorii správná. Někteří odborníci se tedy domnívají, že přiměřené množství poškození buněk způsobené malými dávkami záření může v organismu naopak odstartovat a stimulovat reparační procesy, které opraví radiační poruchy i další defekty, které by obvykle nebyly opraveny. Tato radiačně indukovaná reparace je jakási obdoba imunizace v organismu [14].

## 1.6 Základní způsoby ochrany před zářením

Ochranou před ionizujícím zářením je myšleno co největší snížení absorbované dávky ionizujícího záření, které obdrží organismus, a tím i snížení rizika stochastických a deterministických účinků. Dávka obdržená organismem je ovlivněna hlavně intenzitou, dobou expozice a energií záření. Existují tedy tři základní způsoby ochrany – čas, vzdálenost a stínění.

Absorbovaná dávka je přímo úměrná době, po kterou je organismus záření vystaven. Zkrácením doby kontaktu s ionizujícím zářením tedy snižujeme obdrženou dávku. Druhá mocnina vzdálenosti zdroje záření od ozařované osoby je nepřímo úměrná intenzitě záření. Při práci s ionizujícím zářením se tedy snažíme dodržovat co největší vzdálenost od jeho zdroje. Je důležité uvážit, že za zdroj ionizujícího záření se považuje i pacient, který je právě ozařován. Třetí základní způsob ochrany je stínění. Vhodný materiál pro stínění je vybírán podle druhu záření. Interakce záření s látkami vede k absorpci části nebo celého záření. Stínicí materiál by měl být co nejbližší zdroji záření. Pro záření  $\gamma$  a X se používají látky s vysokou měrnou hustotou, nejčastěji olovo, beton s příměsí barytu nebo olovnaté sklo s vysokým obsahem kysličníku olova. Dostatečná tloušťka olova pro odstínění  $\gamma$  záření o energii 100 keV je 2 mm. Pro odstínění  $\beta^-$  je nejvhodnější plexisklo o tloušťce 5-10 mm s tenkou vrstvou olova, které odstiňuje brzdné záření vznikající interakcí  $\beta^-$  s lehkým stínicím materiálem. Záření  $\alpha$  lze odfiltrovat i listem papíru.

Při práci s otevřenými radionuklidy je důležité se vyvarovat kontaminace radioaktivními látkami. Kontaminace může být vnitřní a vnější, přičemž vnitřní je mnohonásobně nebezpečnější, jelikož dochází k dlouhodobému ozáření organismu zevnitř. K vnitřní kontaminaci dochází nejčastěji dýchacím ústrojím, zažívacím ústrojím nebo průnikem přes kůži. V kontrolovaném pásmu je tedy důležité nejíst, používat rukavice, ochranné masky atd [14].

#### **1.6.1 Protiradonové opatření**

Protiradonovými opatřeními se rozumí ochrana domů, obytných prostor a osob v nich přebývajících. Tato ochrana se provádí pomocí izolace nebo odvětrávání.

Odvětrávání podloží je u novějších staveb realizováno soustavou drenážního potrubí nebo odvětrávanou vzduchovou mezerou. Účel drenážního potrubí je snížení koncentrace radonu pod základovou deskou nebo vytvoření podtlaku v podloží vůči tlaku v interiéru. Půdní vzduch z drenážního potrubí se odvádí do obvodových stěn a prostřednictvím potrubí vyvedeného nad střechu domu. Vzduchová mezera je obvykle tvořena z fólií, které zároveň plní funkci protiradonové izolace. Vzduchová mezera plní stejný úkol jako drenážní potrubí a taktéž musí zasahovat do celé oblasti styku domu s půdou. Pro izolaci radonu často postačí obyčejná hydroizolace domu, u které je ovšem nutno uvážit její součinitel difuze radonu. Obvykle se setkáváme s izolací asfaltovými pásy, syntetickými fóliemi či stěrkami různého chemického složení. Menší ochranu pak zprostředkovávají izolační tapety z PVC, elastické nátěry nebo nátěry epoxidové pryskyřice ARADON [6].



## 2 Detekce záření

Jelikož je ionizující záření okem neviditelné, je třeba jej detekovat použitím vhodných fyzikálních metod aplikovaných v přístrojové technice. Přístrojová technika nám umožňuje záření buď zviditelnit nebo změřit. Měření poskytuje informace o jeho vlastnostech a veličinách, jako je intenzita, energie nebo distribuce v prostoru. Pro měření ionizujícího záření byla vyvinuta řada detektorů, založených na různých principech, souhrnným názvem radiometry. Specifickým radiometrem může být například dozimetr. Dozimetry jsou obvykle jednoduché detekční přístroje, užívající jednotky Gray a Sievert [16].

### 2.1 Základní rozdělení detektorů ionizujícího záření

Základní fyzikální vlastnosti radiometrů jsou citlivost, účinnost, časové rozlišení, energetická rozlišovací schopnost a úhlová rozlišovací schopnost. Detektory ionizujícího záření dělíme podle časového průběhu, principu detekce a komplexnosti měřené informace [16].

#### 2.1.1 Podle časového průběhu

Podle časového průběhu rozeznáváme kontinuální a kumulativní detektory. Kontinuální detektory udávají současné informace o přítomnosti a intenzitě záření. Jeho výstup je tedy úměrný okamžité intenzitě. Není-li detektor ozařován, je na výstupu nula nebo hodnota pozadí.

Kumulativní detektory shromažďují postupně rostoucí odezvu během jejich vystavení záření. Naměřené informace zůstávají uloženy i po ukončení expozice a jsou vyhodnocovány dodatečně. Poskytují údaj o celkové hodnotě za celou dobu měření. Řadí se zde fotografické a materiálové detektory. Využití nacházejí především v radiační dozimetrii [16].

#### 2.1.2 Podle principu detekce

Podle principu detekce dělíme radiometry na fotografické, materiálové a elektronické. Fotografické detektory využívají fotochemických účinků záření nebo fotografického zobrazení stop částic v daném látkovém prostředí.

Materiálové detektory využívají vhodných látek, které mění své vlastnosti při interakci s ionizujícím zářením. Stejně jako fotografické detektory se materiálové vyznačují nízkou citlivostí, používají se tedy pro vysoké intenzity nebo dlouhodobé měření.

Elektronické detektory převádí absorbovanou energii ionizačního záření na elektrický proud. Proud je zesilován, zpracováván a vyhodnocován. Mezi tyto detektory zařazujeme ionizační komoru, scintilační nebo polovodičový detektor [16].

#### 2.1.3 Podle komplexnosti informace

Podle komplexnosti záření dělíme radiometry na detektory záření, které udávají pouze intenzitu záření, případně počet kvant. Neudávají informaci o druhu a energii záření. Řadíme mezi ně například filmové a termoluminiscenční dozimetry [16].

Spektrometry ionizujícího záření poskytují údaj o intenzitě, počtu kvant ale i energii kvant záření, případně jeho další vlastnosti. Vyjadřují tedy informaci o energetickém rozložení kvant sledovaného záření. Takové měření označujeme souhrnným názvem jaderní spektroskopie.

Zobrazovací detektory vizuální či elektronicky vyobrazují rozložení intenzity záření v prostoru. Nejjednodušším příkladem jsou fotografické filmy a luminiscenční stínítka užívané v rentgenové diagnostice.

Dráhové detektory částic vyhodnocují, případně zviditelňují dráhu pohybu částice v prostoru i se zakřivením v magnetickém poli. Tohoto efektu dosahují fotochemickými reakcemi, kondenzací kapiček páry nebo soustavou značného množství prostorově umístěných detektorů [16].

## 2.2 Fotografická detekce

Fotografické detektory pracují v kumulativním režimu. Jejich hlavní součástí je fotografický materiál, na kterém dochází, při dopadu ionizujícího záření, k fotochemické reakci. Fotochemická reakce je každá reakce vyvolaná dopadem záření na molekuly a atomy látky (např. fotosyntéza). Fotografický materiál je tvořen emulzí halogenidu stříbra nebo bromidu stříbrného. Ionizující záření způsobuje rozpad bromidu stříbrného a následné uvolnění atomů stříbra ze sloučeniny AgBr za vzniku latentního (skrytého) obrazu. Obraz není pouhým okem viditelný, je třeba jej vyvolat elektrochemickou reakcí AgBr s vyvolávacím činidlem [16].

Nejjednodušší fotografický detektor je filmový dozimetr. Obsahuje světlotěsně zabalené políčko filmu, kterým prochází ionizující záření a vytváří již zmíněný latentní obraz. Po vyvolání dostáváme černo-bílý obraz, kde můžeme pozorovat lineární závislost mezi dávkou ozáření a zčernáním materiálu. Filmové dozimetry nacházejí své využití zejména pro osobní dozimetrii pracovníků s ionizujícím zářením. Na stejném principu fungují také kazety užívané při rentgenovém zobrazení [16].

### 2.2.1 Materiálové detektory

Materiálové detektory pracují stejně jako fotografické v kumulativním režimu. Využívají fyzikální a chemické změny způsobené průchodem ionizujícího záření vhodným materiálem. Pozorované změny mohou být excitace, změny v krystalové mřížce nebo změna barvy a elektrické vodivosti. Množství záření ovlivňuje míru těchto fyzikálních a chemických účinků. Tento princip je využíván v termoluminiscenčních a fotoluminiscenčních dozimetrech.

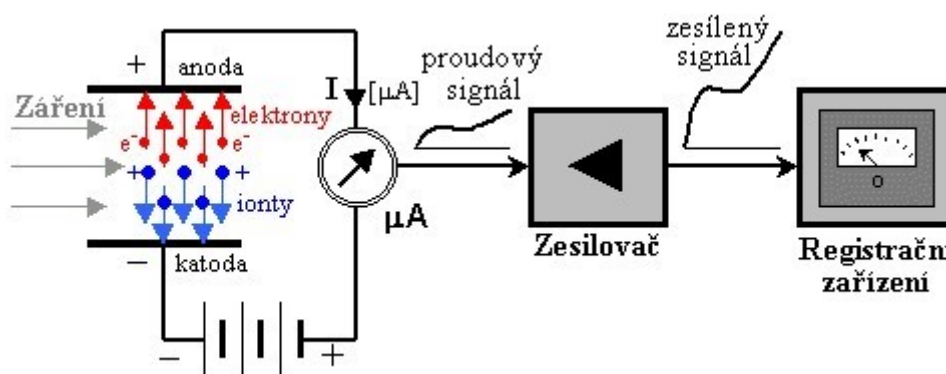
Termoluminiscenční TLD dozimetry obsahují přesně určené množství termoluminiscenční látky, která se vystavuje účinku záření v místě kde je třeba určit radiační dávku. Po ukončení expozice se látka zahřeje na teplotu 160-300 °C a je snímáno viditelné světlo, ze kterého se v závislosti na teplotě určuje dávka v dozimetru.

Měření fotoluminiscenčními PLD dozimetry fungují na podobném principu jako TLD. Aktivní látka ovšem po konci expozice není zahřívána, ale ozářena LED diodou světlem větší

vlnové délky, čímž vzniká luminiscence o kratší vlnové délce. Zachycená luminiscence podává informaci o ozáření dozimetru [16].

## 2.3 Ionizační komory

Ionizační komora, vyplněna plynovou náplní, je nejjednodušší elektronický detektor záření. Je tvořena dvěma elektrodami (anodou a katodou), které jsou umístěny v inertním chemicky stabilním plynu. Elektrody jsou připojeny ke zdroji elektrického napětí v řádu stovek voltů. Nenachází-li se mezi elektrodami ionizující záření, obvodem neprochází proud. Při průchodu záření mezi katodou a anodou jsou z neutrálních atomů plynu vyráženy elektrony a mění se na kladné ionty. Elektrody se přemísťují k anodě a kladné ionty ke katodě, čímž začne obvodem protékat slabý proud. Velikost naměřeného proudu je přímo úměrná intenzitě záření nebo dávkového příkonu [16].



Obrázek 2.1 Schématické provedení ionizační komory [16]

Na podobném principu pracuje i Geiger-Müllerův počítač. Taktéž se skládá z anody a katody, které jsou ovšem umístěny ve zředěném plynu, obvykle o nižším než atmosférickém tlaku. Při průchodu záření komorou je plyn ionizován, elektrony se přemísťují ke kladné elektrodě, kladné ionty k záporné elektrodě. Částice získají ve zředěném plynu tak vysokou kinetickou energii, že jsou schopny vyrážet další sekundární elektrony a tím tvořit další ionty. Tyto sekundární elektrony pak tvoří další sekundární elektrony, a tak dále. Proces probíhá lavinovitě a tím vytváří na pracovním odporu relativně vysoký napěťový impuls, který je dále zpracováván a vyhodnocován počítačem [16].

### 2.3.1 Mrtvá doba detektorů

V době trvání lavinového výboje v Geiger-Müllerově nevyhodnocuje detektor, podobně jako scintilační a polovodičový, žádné jiné záření. Tato doba se nazývá mrtvá doba detektoru. Značí se řeckým písmenem  $\tau$  nebo zkratkou Dead Time, D.T. Měří se v mikrosekundách. Na některých detektorech se můžeme setkat s časovou rozlišovací schopností, což je jen jiné pojmenování mrtvé doby D.T. U Geiger-Müllerova detektoru se pohybuje okolo 100  $\mu$ s [16].

## 2.4 Scintilační detektor

Scintilační detektory využívají pro měření ionizujícího záření principu radioluminiscence. Radioluminiscence je vlastnost některých látek reagovat na úplné nebo částečné pohlcení kvant ionizujícího záření scintilacemi neboli světelnými záblesky. Záblesky jsou zaznamenány fotonásobičem. Pro detekci záření gama se nejčastěji využívá monokrystal jodidu sodného, aktivovaný thaliem [16].

## 2.5 Polovodičové detektory

Polovodičový detektor se svým mechanismem funkce velmi podobá ionizační komoře, ovšem inertní plyn je zde nahrazen polovodičem. Tento typ detektoru se chová jako dioda zapojená v závěrném směru do obvodu s napětím 1-2 kV skrze velký odpor. V klidovém stavu tedy neprotéká obvodem proud. Při vniku kvanta ionizujícího záření do aktivní vrstvy detektoru dojde v polovodiči k přeskočení úměrného množství elektronů do vodivého pásma a vzniku elektron-děrových párů. Elektrony se okamžitě přemísťují směrem k anodě a elektronové díry ke katodě. Vznikne krátký impuls na pracovním odporu a před kondenzátor je odveden k předzesilovači. Energie detekovaného záření, která se absorbovala při průchodu aktivní vrstvou, je přímo úměrná amplitudě měřeného napětí a celkovému sebranému náboji. Amplitudovou analýzou impulsů je možno provádět spektrometrickou analýzu stejně jako u scintilačních detektorů.

Velká výhoda polovodičových detektorů je možnost miniaturizace jednotlivých polovodičových elementů a sestavení multidetektorového systému, poskytujícího informace jak o energii, tak o místě dopadu kvant záření. Polovodičové detektory tedy mohou mít i zobrazovací vlastnosti [16].

## 2.6 Magnetický spektrometr

Magnetický spektrometr je nejdokonalejší přístroj pro měření energie částic s nábojem. Využívá principu silového působení magnetického pole na nabitě částice v pohybu. Po vniku nabitě částice do magnetického pole na ní začne působit Lorentzova síla, která způsobí zakřivení dráhy částice. Pohybuje-li se částice kolmo ke směru magnetického pole působí na ni radiální Lorentzova síla v rovnováze s odstředivou silou. Částice se tedy bude pohybovat v kružnicích o určitém poloměru. Ze změřeného poloměru zakřivení dráhy, hmotnosti a náboje můžeme vypočítat energii částice [16].

## 2.7 Měření radonu

K měření dlouhodobé průměrné koncentrace radonu v terénu a interiérech budov se užívají stopové detektory. Hlavní součástí těchto typů detektorů je krystalová mřížka např. ze slídy nebo z organických polymerů. Pokud na tuto mřížku dopadne hustě ionizující částice, především

tedy částice  $\alpha$ , dojde na ní k poškození. Tyto poškození jsou chemicky citlivější než zbytek materiálu a lze je vyleptat do pozorovatelných rozměrů, které se pak manuálně, či optoelektronicky počítají. Podle hustoty spot vytvořených  $\alpha$  částicemi z radioaktivity radonu a jeho dceřiných produktů můžeme vypočítat jeho koncentraci ve vzduchu.

Průměrná koncentrace radonu v ovzduší je měřitelná také elektretovými detektory. Elektretový detektor je zjednodušená varianta ionizační komory. Elektronické pole není buzeno zdrojem napětí, ale elektretem (nevodivá látka, která si udržuje trvalou elektrickou polarizaci i po odstranění vnějšího elektrického pole – elektrická obdoba permanentního magnetu). V komoře je vytvářen náboj díky přítomnosti elektretu. Záření, které vstoupí do komory nebo vznikající přímo ve vzduchu ionizuje plyn a elektret přitahuje záporné elektrony, čímž ho postupně vybíjí. Čím více je elektret vybitý, tím větší množství záření vniklo do komory a bylo absorbováno. Měření radonu je realizovatelné také polovodičovým detektorem [16].

### 3 Seznámení se s parametry přístrojů

Pro realizaci laboratorní úlohy pro měření radioaktivních emisí bylo fakultou poskytnuto 5 různých druhů měřičů různého způsobu využití, či stáří. Jedná se o Operativní měřič radiace RDS-30, radiometr RBG T 62 a, detektor radonu SIRAD MR-106 N, dozimetr s detektorem nebezpečných plynů GUARD AQM-22 – MERA a gama indikátor PM1208M ve formě hodinek. Pro určitá měření byl na oddělení nukleární medicíny ve fakultní nemocnici v Ostravě zpřístupněn scintilační gama spektrometr s mnohakanálovým analyzátozem. Měření ionizujícího záření probíhalo na RTG aparátu od firmy Leybold.

#### 3.1 Radiometr RBG T 62 a

Tento tranzistorový radiometr slouží dle příručky k určení stupně radioaktivního zamoření oděvů, kůže či jiných objektů. Při obvyklých podmínkách je jeho chyba měření  $\pm 20\%$ . Přístroj je vybaven knoflíkem na přepínání mikro ampérové stupnice, která popisuje počet radioaktivních rozpadů za minutu na  $\text{cm}^2$ , zdířku na sluchátka, kalibrační potenciometr a měřící sondu obsahující Geiger-Müllerovu trubici. Tento přístroj není schopen měřit alfa částice [17].



*Obrázek 3.1 Radiometr RBG T 61 a s připojenou sondou a sluchátkem*

### 3.2 Operativní měřič radiace RADOS RDS-30

RDS-30 je všestranný měřič radioaktivního záření, konkrétně tedy dávkového příkonu. Je vybaven digitálním displejem, jedním tlačítkem a možností propojení s PC pomocí IrDA portu. O jeho napájení se starají 2 alkalické články AA. Přístroj vydává sekvenční alarmy při překročení předem nakonfigurovaných hodnot dávkového příkonu. Výhodou je nízká hmotnost 220 g, malé rozměry, vodotěsnost a výdrž baterie až 2000 hodin za normálního pozadí. Měřič detekuje záření gama a X-záření o energii 48 keV až 1,3 MeV, k čemuž využívá jednu energeticky kompenzovanou Geiger-Müllerovu trubici. Střed trubice je umístěn v horní části přístroje. Měřicí rozsah dávkového příkonu je 0,01  $\mu\text{Sv/h}$ –100 mSv/h, měřicí rozsah dávky je od 0,01  $\mu\text{S}$  – 1 Sv. Přístroj může být nakonfigurován pro měření dvou jednotek:  $\mu\text{Sv/h}$  a mrem/h. Naměřené hodnoty je také schopen ukládat ve formě histogramu, který může být nakonfigurován tak, aby ukládal okamžitou hodnotu dávkového příkonu, průměrný dávkový příkon v určitém intervalu nebo maximální dávkový příkon v průběhu intervalu histogramu [18].



Obrázek 3.2 Operativní měřič RADON RDS-30

Normální hodnoty dávkového příkonu v laboratoři fei se pohybovaly v okolí 0,11  $\mu\text{Sv/h}$ . Po přiložení radioaktivních hodiněk (obrázek 3.3) k horní části měřiče se na displeji objevovali hodnoty od 5,28 do 5,46  $\mu\text{Sv/h}$  po 20 sekundách měření.



*Obrázek 3.3 Radioaktivní hodinky*

### 3.3 GUARD AQM-22 MEPA

AQM-22 je analyzátor plynů ruské výroby určený pro plynulé měření a vyhodnocování parametrů okolního prostředí. Přístroj disponuje ukazatelem kontaminace vzduchu, měřičem výkonu expoziční dávky ionizujícího záření, měřičem alkoholu v dechu a alarmy signalizující vysoké hodnoty expoziční dávky nebo znečištění prostředí. Přístroj měří úroveň radioaktivního pozadí v jednotkách  $\mu\text{R/h}$ , tedy v mikroröntgenech za hodinu, ze kterého po vydělení jedním stem dostaneme nám známější hodnotu v  $\mu\text{Sv/h}$ . Měřicí rozsah přístroje je 0 až 999  $\mu\text{R/h}$  (9,99  $\mu\text{Sv/h}$ ). Pravděpodobnost bezchybné funkce tohoto přístroje v průběhu 1000 provozních hodin činí 0,92 [19].

V laboratoři budovy fei se hodnoty radiačního pozadí naměřené tímto přístrojem pohybovaly v rozmezí 10 až 15  $\mu\text{R/h}$ . V bezprostřední blízkosti radioaktivních hodinek se hodnoty po 15 sekundách měření vyšplhaly až na 520  $\mu\text{R/h}$ .



*Obrázek 3.4 Analyzátor plynů GUARD AQM-22 MEPA*



### 3.4 Detektor radonu SIRAD MR-106 N

Tento produkt slouží k určování ekvivalentní rovnovážné objemové aktivity dceřiných prvků isotopu radonu-222 ve vzduchu v místnosti. Radonová aktivita je měřena v jednotkách  $\text{Bq/m}^3$  v rozsahu 50–1000  $\text{Bq/m}^3$ . Dovoluje zobrazit změny radonové aktivity, případně signalizovat zdraví nebezpečné hodnoty a tyto data přesunout do PC. Měření probíhá při dlouhém časovém intervalu, minimálně 4 hodiny, obvykle však více než 24 hodin. Napájení je realizováno pomocí dvou AA baterií. První numerická hodnota je vyobrazena po 4 hodinách od spuštění měřiče. Radonová aktivita je určována jedním detektorem a následně třemi algoritmy: threshold (práh), current (aktuální), averaged (průměrné). Algoritmus threshold zpracovává hodnotu radonové aktivity měřením rychlosti generování alfa částic a podává jeho aktuální hodnotu. Algoritmus current detekuje hodnotu radonové aktivity podle množství alfa částic při minimální délce měření 4 hodiny. Algoritmus averaged udává aritmetický průměr hodnot radonové aktivity pro každý měřený interval podle kvantity registrovaných alfa částic v rozsahu od 4 do 3360 hodin.

Display vyobrazuje pomocí hvězdiček množství registrovaných alfa částic (\* odpovídá 50-100  $\text{Bq/m}^3$ , \*\* odpovídá 100-200  $\text{Bq/m}^3$ , \*\*\* odpovídá více než 200  $\text{Bq/m}^3$ ), průměrnou hodnotu radonové aktivity v  $\text{Bq/m}^3$ , datum a čas. Jednotlivá měření jsou přístrojem ukládány.



Obrázek 3.5 Radonový detektor SIRAD MR-106 N

### 3.5 Gama detektor PM1208M

Detektor nabízí kontinuální indikaci ekvivalentní dávky (DE) nebo závazné ekvivalentní dávky (DER) gama záření a zvukový alarm upozorňující na zvýšené radioaktivní nebezpečí. Měření je realizováno Geiger-Müllerovou trubicí, která konvertuje kvanta gama záření na elektronické pulsy, dále zpracováváné mikroprocesorem. Naměřené hodnoty jsou ukládány a přes

IrDA port mohou být přesunuty do PC. Radioaktivita je měřitelná i ve vodě do hloubky až 100 m. Rozsah hodnot měřených tímto zařízením je pro režim DE od 0,001 do 999,999 mSv, pro DER 0,01 až 9999,99  $\mu\text{Sv/h}$ , při energii záření 0,06 až 1,5 MeV. Minimální délka měření by neměla být nižší než 1 hodina. Hodnota relativní chyby měření je  $\pm 5\%$ .



Obrázek 3.6 Hodinkový gama detektor PM1208M

### 3.6 Shrnutí parametrů radiometrů

Tabulka číslo 4 obsahuje shrnutí důležitých specifikací dostupných radiometrů.

Tabulka 4 Specifikace radiometrů

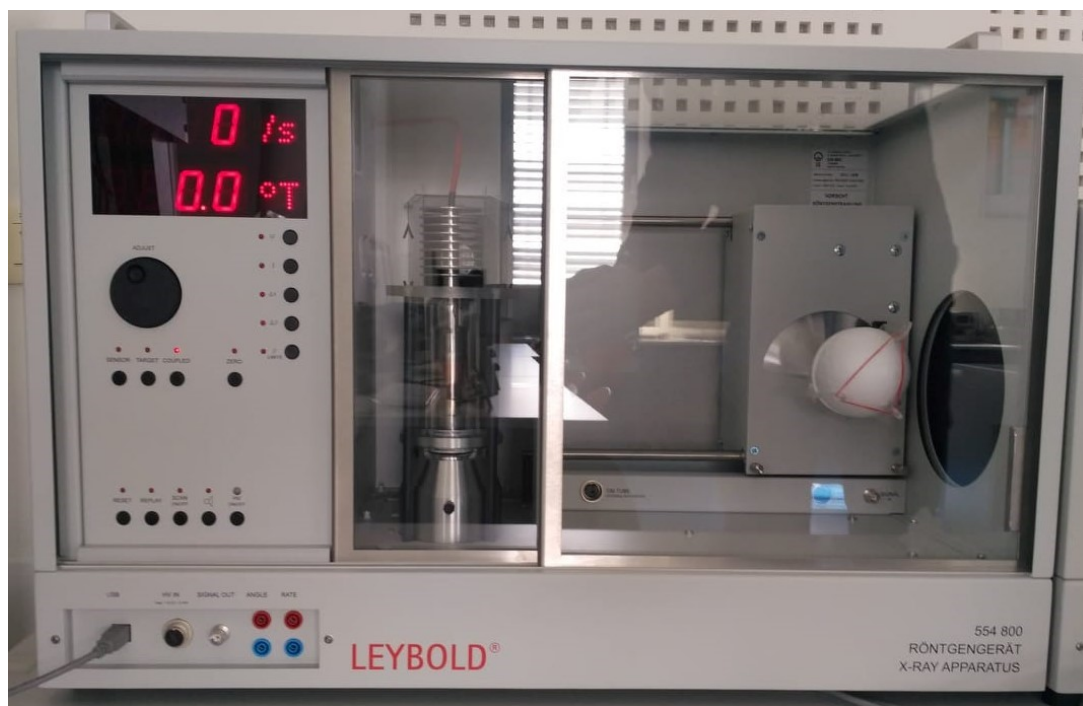
Operativní měřič radiace RDS-30			
Detekované záření	Gama a X-záření, 48 keV až 1,3 MeV	Přesnost kalibrace	$\pm 5\%$ při 3 mSv/h a $+20^\circ\text{C}$
Detektor	Jedna energeticky kompenzovaná GM trubice	Energetická odezva	$\pm 30\%$ v rozsahu 48 keV – 1,3 MeV
Měřicí rozsah	Dávkový příkon: 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 100 mSv/h Dávka: 0,01 $\mu\text{Sv}$ – 1 Sv	Úhlová závislost	$\pm 15\%$ v rozmezí $\pm 45^\circ$ od kalibračního směru při energii 48 keV

Gama indikátor PM1208M			
Detekované záření	Gama záření, 0,06 až 1,5 MeV	Realtivní chyba měření při normálních podmínkách	±5 %
Detektor	GM trubice	Realtivní chyba pod vlivem rušivého elektromag. pole	±15 %
Měřicí rozsah	Dávkový příkon: 0,01 – 9999,99 µSv/h Dávka: 0,001 – 999,99 mSv	Relativní chyba při teplotě na 40 °C	±5 %
Dozimetr s detektorem nebezpečných plynů GUARD AQM-22 - MERA			
Detekované záření	Alfa (radon), beta, gama	Měřicí rozsah	0 – 999 µR/h
Radiometr RBG T 62 A			
Detekované záření	Beta, gama, od 0,4 MeV	Jednotky pro úroveň radiace	$\frac{mr}{hod.}$
Detektor	Nízkonapěťová plášťová GM trubice	Relativní chyba při normálních podmínkách	±20 %
Jednotky pro stupeň zamoření	$\frac{rozpady}{min. cm^2}$	Chyba měření při vlhkosti na 95 %	±30 %
Radon detekující indikátor SIRAD MR-106 N			
Rozsah měření	50 – 10 000 Bq/m <sup>3</sup>	Čas ustavení operačního módu	Maximálně 20 minut
Nekratší měření	4 hodiny	Nejkratší doma pro přesné měření	Aspoň 24 hodin

### 3.7 RTG Leybold

Rentgenový aparát tohoto typu obsahuje rentgenku s wolframovou anodou umístěnou za odsunutelným ochranným olověným sklem. Skrze kolimátor vyzařuje ionizující záření

překračující až 10 Sv/h. Ionizující záření je skrz kolimátor směřováno do experimentální komory, která je taktéž chráněna před únikem záření do prostoru odsunutelným olověným sklem. Skrze ochranné sklo by nemělo proniknout záření o vyšších hodnotách než 1  $\mu\text{Sv/h}$ . Maximální operační proud rentgenky je 1 mA a maximální napětí 35 kV. Experimentální komora aparátu obsahuje goniometr s nastavitelným úhlem otáčení v režimu CT scanu.



*Obrázek 3.7 RTG aparát Leybold*

## 4 Laboratorní úloha pro měření radioaktivních emisí

### 4.1 Cíl úlohy

- Seznámení se s radiometry a pochopení chování radioaktivního záření.
- Možnosti a způsoby stínění radioaktivního záření.
- Víte, co dýcháte? Změřte si to.
- Naučte se rozpoznávat izotop.
- X paprsky kolem nás, jak se chovají?

### 4.2 Zadání

1. Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry.
2. Měření koncentrace radonu v obytných domech a sklepech.
3. Měření ionizujícího záření emitovaného rentgenkou.

### 4.3 Předpokládané znalosti

- Záznamník s návodem k obsluze pro radiometr RBG T 62 A
- Příručka uživatele RDS-30 operativní měřič radiace
- Návod k použití dozimetru s detektorem nebezpečných plynů GUARD AQM-22 – MERA
- Radon detecting indicator SIRAD MR-106N Maintenance manual
- Wrist gamma indicator PM1208M operating manual

### 4.4 Vstupní otázky

1. Kde se nachází střed detektoru RADOS RDS-30, GUARD AQM-22 MEPA a gama detektor PM1208M?
2. V jakých jednotkách a veličinách měří všechny dostupné radiometry?
3. Z manuálu zjistěte, jak dlouho musí minimálně probíhat měření radonu detektorem SIRAD MR-106 N?
4. Co je potřeba udělat s radiometrem RBG T 62 před začátkem měření?
5. Je třeba se obávat  $\alpha$  a  $\beta$  záření?
6. Jaké jsou 4 základní principy ochrany před radioaktivním zářením?

### 4.5 Použité vybavení

- Radiometr RBG T 62 a se sondou a sluchátkem
- Operativní měřič radiace RADOS RDS-30
- Analyzátor plynů GUARD AQM-22 MEPA
- Detektor radonu SIRAD MR-106 N
- Gama detektor PM1208M v hodinkách
- Přírodní zdroj – náramkové hodinky Maják 16 kamenů

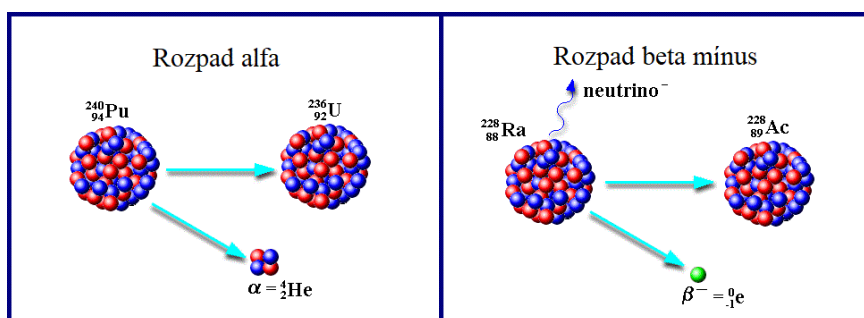
- Pásmové měřidlo
- Kancelářský papír
- Karton
- Dřevo
- Olověná guma
- RTG Leybold

## 4.6 Teoretický rozbor

Jako radioaktivitu chápeme jev, při kterém dojde k samovolné přeměně jádra jednoho prvku na jádro jiného prvku, stabilnějšího prvku. Při takové přeměně se uvolní velké množství energie a ta je vyzářena v podobě radioaktivního záření. Toto záření je okem neviditelné, ale zaznamenané radiometry nebo spektrometry.

### 4.6.1 Dělení radioaktivního záření a naše ochrana

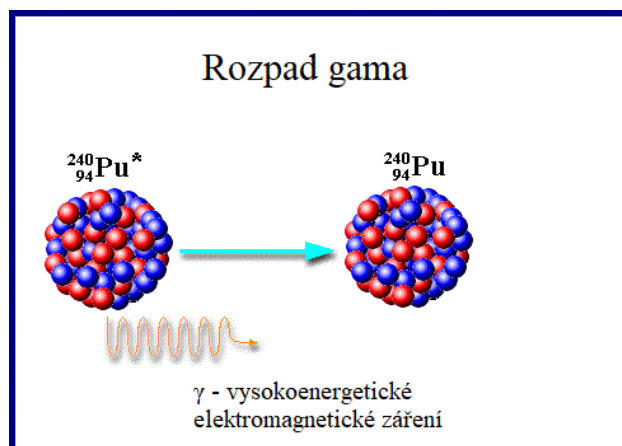
Dělíme jej do 3 základních skupin podle druhu vyzářené částice –  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Záření alfa je nejslabší ze zmíněné trojice, k jeho úplnému odstínění postačí tenký list papíru, neprojde tedy ani přes pokožku, přesto ale může člověka ohrozit při inhalaci nebo konzumaci například radioaktivního prachu. Vyzářenou částicí alfa se rozumí jádro hélia  ${}^4_2\text{He}$ . Se zářením  $\beta$  se setkáváme u přírodních zdrojů radiace nejčastěji. Emitovanou částicí zde v případě radioaktivity  $\beta^-$  představuje záporně nabitý elektron  $e^-$  a v případě radiace  $\beta^+$  pozorujeme kladně nabitou antičástici elektronu – pozitron  $e^+$ . Beta záření je řádově až stokrát intenzivnější než alfa. Pro úplné odstínění je dostačující hliníkový plát o šířce aspoň 1 mm. U beta záření dochází taktéž ke vzniku mikročástice neutrino. Neutrino je spolu s fotonem nejhojněji se vyskytující částice ve vesmíru. Téměř nereaguje s prostředím, proto ji v našem měření můžeme zanedbat.



Obrázek 4.1 Vznik alfa a beta částice [20]

Nejintenzivnější záření ze zmíněné trojice vzniká při radioaktivitě  $\gamma$ . Gama je tvořena proudem fotonu bez jakéhokoliv elektrického náboje. Pro člověka je vysoce nebezpečné, k odstínění se používají obvykle různé kovy, nejčastěji olovo nebo baryt. V nemocnici se můžeme setkat například s barytovými omítkami. Umělými zdroji jsme schopni vytvořit ionizující

záření X neboli Rentgenové záření. Je to elektromagnetické záření o nízké vlnové délce, vysoce nebezpečné pro člověka. Vzniká v rentgenkách, lineárních nebo kruhových urychlovačích, kde dochází k urychlení nabitých částic elektrodami s odlišným nábojem a následným navedením této částice na elektronový terč. Po dopadu urychlené částice dochází ke vzniku brzdného nebo charakteristického Rentgenového záření. Odstiňujeme jej stejně jako záření gama, jeho využití je zejména v lékařské diagnostice a v radioterapii.



Obrázek 4.2 Vznik gama záření [20]

#### 4.6.2 Zdroje radiace

V zemské kůře se vyskytuje poměrně velké množství přírodních radionuklidů, některé se zachovaly již z dob vzniku Země, ostatní jsou jejich produkty vzniklé rozpadem těchto původních radionuklidů. Je ovšem třeba si uvědomit, že sama Země a vše co se na ní nachází je také radioaktivní, např. káva, uhelný popílek, člověk. Zároveň je člověk neustále ozařován zářením z vesmíru nebo radonem. S ozářením přírodními zdroji a lékařskými ozářenými se nepočítá ve stanovených limitech pro ozáření obyvatelstva - 1000  $\mu\text{Sv/rok}$ .

##### 4.6.2.1 Radon

Radon  $^{222}\text{Rn}$  je plyn vznikající postupnou přeměnou z uranu, který může za cca 60 % celkového ozáření člověka za normálního stavu (tedy bez jaderných havárií nebo radioterapií). Při rozpadu vyzařuje částici alfa. Jelikož je radon plynného skupenství, dochází k jeho inhalaci, což má za následek zvýšení šance vzniku karcinomu plic. Rozpadá se na dceřiný prvek, který vyzařuje při rozpadu částici beta. Při nedostatečném odvětrávání nebo špatné konstrukce domu dochází v místnosti ke kumulování radonu vycházejícího z půdy, proto je třeba provádět jeho měření a při stavbě provádět ochranná opatření, obvykle postačuje klasická hydroizolace a odvětrávání zdí. Podle vyhlášky o radiační ochraně je stanovena maximální průměrná hodnota objemové aktivity radonu na 400  $\text{Bq/m}^3$  ve stávajících budovách a v nových domech na 200  $\text{Bq/m}^3$ .

#### 4.6.3 Radiace a organismus

Účinky radiace na člověka dělíme na stochastické a deterministické. Stochastické účinky jsou zcela náhodné a individuální, nezávisí na absorbované dávce ani na její výši. Hovoří pouze o pravděpodobnosti výskytu. Deterministické účinky se naopak dostavují po dosažení určité prahové dávky. Poškození tkáně a závažnost poškození je přímo úměrné velikosti dávky. Ozáření organismu se nejčastěji projevuje poškozením DNA buněk a následnou mutací při množení a vznikem volných radikálů, které štěpí vnitřní molekulární vazby a degradují jejich strukturu. Různé buňky v těle jsou různě radiorezistivní, případně různě radiosenzitivní. Nej náchylnější na poškození jsou buňky kostní dřeně, lymfatické tkáně a epitelové. Naopak nejodolnější jsou buňky nervové svalové a vazivové.

#### 4.6.4 Měření radiace

Radiace je měřitelná pomocí radiometrů. Radiometry podle principu měření dělíme na fotografické, materiálové a elektronické. Fotografické využívají fotochemických účinků záření v látkovém prostředí. Materiálové detektory obsahují látky, které mění své vlastnosti při interakci se zářením. Jak materiálové, tak fotografické detektory se vyznačují slabou citlivostí, jejich využití je tedy vhodné pro dlouhodobá měření nebo měření vysokých intenzit. V této laboratorní práci budeme využívat zejména elektronické detektory, které převádí absorbovanou energii záření na elektrický proud. Jsou to detektory scintilační, polovodičové a ionizační komora. Ionizační komora se skládá z katody a anody, jež jsou umístěny v komoře s inertním chemicky stabilním plynem. Při vstupu záření do komory jsou z inertního plynu vyraženy elektrony, čímž se plyn stává vodivým, mezi katodou a anodou prochází proud, který je zesílen, zaznamenán a přepočítán na požadovanou veličinu. Polovodičové detektory se principem funkce ionizační komory velmi podobají. Plyn je zde nahrazen polovodičem, jež se zapojením podobá diodě v závěrném směru. Při vstupu záření do polovodiče dojde k přeskočení elektronů do vodivého pásma a vzniku elektronových děr. Elektrony se přemísťují k anodě, díry ke katodě. Zaznamenaný impuls je poté přímo úměrný energii záření a dále se přepočítává na požadovanou veličinu. Scintilační detektory využívají radioluminiscence látek. Při styku radioluminiscenční látky se zářením dojde k scintilacím neboli světelným zábleskům, které se zaznamenávají fotonásobičem a vyhodnocují v mikroprocesoru.

#### 4.7 Postup měření

Měření budou realizována v různých laboratořích na Fakultě elektrotechniky a informatiky, na oddělení nukleární medicíny ve Fakultní nemocnici v Ostravě a v obytných budovách v Moravskoslezském kraji.

#### 4.8 Postup k bodu zadání č.1: Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry

Tento bod zadání se bude dělit na tři části. V první části použijeme pro měření každého zdroje všech dostupných radiometrů, které přiložíme co nejblíže ke zdroji. Dále změříme změny



naměřených hodnot s rostoucí vzdáleností od zdroje a ve třetí části zakomponujeme mezi radiometr a zdroj různé druhy stínění.

#### 4.8.1.1 Měření přírodního zdroje všemi dostupnými radiometry

1. Prostudujte manuály přiložené k radiometrům, které budete používat.
2. Pro první měření zvolte operativní měřič radiace RADOS RDS-30, jehož výsledky budeme považovat za nejpřesnější.
3. Radiometr RADOS RDS-30 spustíte podržením tlačítka a vyčkejte, než začne měřit. Hodnotu bez přítomnosti zdroje záření запиšte do tabulky 5. Poté jeho střed, jež jste zjistili v manuálu přístroje, přiložte k ciferníku radioaktivních hodinek na co nejmenší možnou vzdálenost. Měření provádějte aspoň 40 sekund.
4. Nejvyšší naměřené hodnoty si poznamenejte a RDS-30 vypněte dlouhým podržením tlačítka do té doby, než se na displeji objeví nápis „off“, poté dalším podržením tlačítka radiometr vypnete.
5. U všech měření věnujte pozornosti jednotkám.
6. Poté zvolte Analyzátor plynů GUARD AQM-22 MEPA, připojte jej do sítě a dojde k jeho automatickému spuštění, opište naměřenou hodnotu (viz. Obrázek \_\_) bez zdroje záření v blízkosti do tabulky 5.
7. Přiložte k němu jednotlivé vzorky a hodnotu z displeje si zaznamenejte. U tohoto měření věnujte zvýšenou pozornost jednotkám.
8. Měření poté opakujte i pro Radiometr RBG T 62, připojte k němu sondu, sluchátko a knoflík otočte do režimu KN (kontrola napětí), otočným knoflíkem nastavte ručičku na rysku KN. Poté podle manuálu zvolte režim I, II nebo III. Před měřením je potřeba nastavit také sondu do pozice  $\beta 1$ ,  $\beta 2$  nebo  $\gamma$ .
9. Gama detektor PM1208M v hodinkách nastavte podle manuálu do režimu DER, opět zaznamenejte hodnotu bez přítomnosti zdroje a opakujte měření. Nezapomeňte zjistit, kde se nachází střed detektoru.
10. Všechny neměřené hodnoty uveďte v předpřipravené tabulce včetně jednotek.
11. Podle jednotek určete, o jakou měřenou veličinu se jedná.
12. Zhodnoťte, proč jste radiometrem RBG T 62a naměřili hodnoty, které jste naměřili.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty k bodu zadání č. 1

	RDS-30	AQM-22	PM1208M	RBG T 62a
Bez zdroje záření				
Radioaktivní hodinky				
Jednotka				

#### 4.8.1.2 Měření přírodního zdroje na různé vzdálenosti

1. Pro tento bod měření budeme využívat operativní měřič radiace RADOS RDS-30.

2. Zvolte si přírodní zdroj záření a radiometr umístěte podle pásmového měřidla do vzdálenosti 5 mm od něj.
3. Naměřenou hodnotu zaznamenejte do tabulky 6 a měření opakujte pro další vzdálenosti uvedené ve zmiňované tabulce.
4. Z naměřených dat vytvořte graf závislosti měřené veličiny a vzdálenosti měřiče od přírodního zdroje záření. Graf okomentujte.

*Tabulka 6 Naměřené hodnoty v závislosti na vzdálenost*

Vzdálenost [mm]	Dávkový příkon [μSv/h]	Vzdálenost [mm]	Dávkový příkon [μSv/h]
5		55	
10		60	
15		70	
20		80	
25		90	
30		100	
35		150	
40		250	
45		500	
50		1000	

#### **4.8.1.3 Měření přírodních zdrojů v závislosti na stínění**

1. V tomto měření budete znovu používat operativní měřič radiace RADOS RDS-30.
2. Střed detektoru umístěte do vzdálenosti 5 mm od zvoleného zdroje záření a naměřenou hodnotu uveďte do výsledků.
3. Vložte mezi zářič kancelářský papír a odečtěte naměřenou hodnotu do. Naměřenou hodnotu uveďte ve tabulce 7 a stejně postupujte s kartonem, dřevem a olověnou gumou. Ve výsledcích vypočítejte procentuální úbytek záření po průchodu stínícím materiálem.
4. Sestavte graf popisující chování záření po průchodu stíněním.

Tabulka 7 Stínění

Typ stínění	Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Procentuální úbytek [%]
Bez stínění		
Kancelářský papír		
Karton		
Dřevo		
Olověná guma		

#### 4.8.2 Postup k bodu zadání č.2: Měření koncentrace radonu

Tuto část laboratorní úlohy není možné měřit v laboratoři. Měřič radiace vám bude na smluvenou dobu propůjčen a měření provedete ve 3 místnostech dle vaší volby.

1. Pro toto měření budeme využívat měřič radiace SIRAD MR-106 N
2. Dlouhým stisknutím tlačítka „ENTER“ spustíte měřič.
3. Vytáhněte ze zadní části stojan, aby k zadní části měřiče volně přistupoval vzduch.
4. Měřič měří okamžitě po spuštění, hodnoty se ovšem objeví až po dosažení minimální doby pro měření.
5. Naměřená data poté dohledáte stiskem tlačítka „ENTER“, v menu vyberete položku „Measurements“, „Previous“ a zde jsou uložena data, popsána datumem. Data jsou popsána jednou číselnou hodnotou a jedním velkým písmenem.
6. Zapište si data naměřená v nejkratším možném časovém intervalu (zjistíte z manuálu a dopište do tabulky), poté v měření pokračujte a další hodnotu si poznamenejte, jakmile bude měření probíhat 24 hodin.
7. Měření opakujte pro další 2 místnosti. Hodnoty uveďte do tabulky 8 a hodnoty vysvětlete.

Tabulka 8 Koncentrace radonu

Doba měření	Nejkratší možná doba	24 hodin
Místnost 1		
Místnost 2		
Místnost 3		

#### 4.8.3 Postup k bodu zadání č.3: Paprsky X kolem nás a jak se chovají

V této kapitole se seznámíte s RTG aparátem, vyzkoušíte si jeho ovládání, a nakonec si samotné RTG záření změříme operativním radiometrem RADOS RDS-30.

#### 4.8.3.1 Seznámení se s RTG Leybold

1. Prohlédněte si X-ray aparát Leybold, přiložený návod a ve výsledcích popište jeho stěžejní části na fotografii. Také pořídte fotografii rentgenky a popište všechny základní části, které znáte.
2. Najděte dávku, kterou je aparát schopen vyžářit při nastavení maximálních parametrů a maximální dávku, kterou bychom mohli naměřit v okolí přístroje za jeho chodu na maximální výkon.
3. Ujistěte se, že jsou obě okna z oloveného skla bezpečně uzavřené, poté aparát spustíte přepínačem, který se nachází na pravém (z vašeho pohledu levém) boku přístroje, vedle napájecího kabelu.
4. Stisknutím tlačítka U a otáčením knoflíku „ADJUST“ nastavujete hodnotu napětí. Stiskem tlačítka I přejedete do režimu nastavení proudu. Do výsledku uveďte maximální a minimální nastavitelné hodnoty obou veličin.

#### 4.8.3.2 Měření ionizujícího záření v okolí RTG

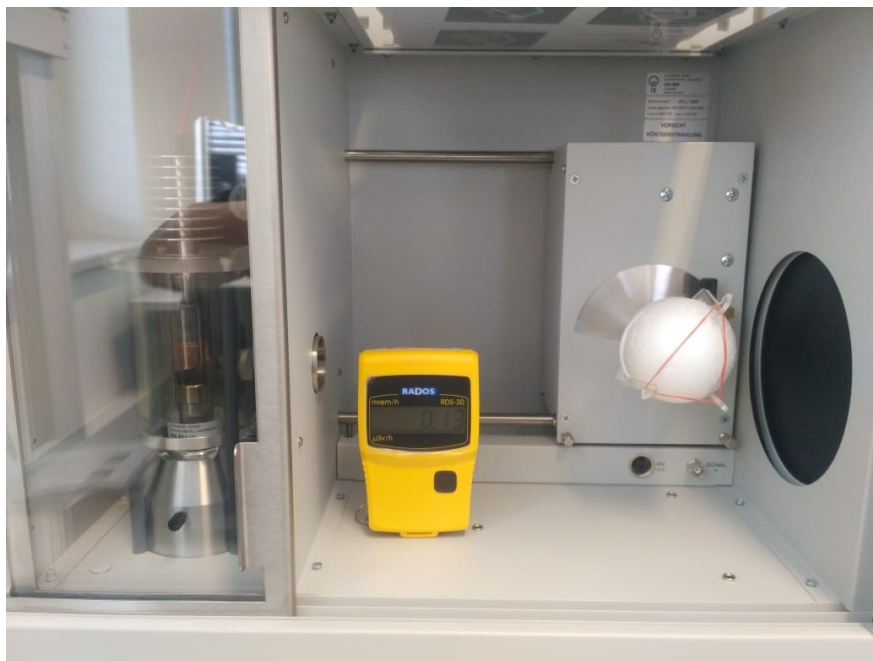
1. Dlouhým podržením tlačítka zapnete operativní měřič radiace RADOS RDS-30 a zaznamenejte si hodnotu radiace v laboratoři.
2. Nastavte proud a napětí RTG aparátu na maximální možnou hodnotu.
3. Znovu se ujistěte, že jsou obě ochranná skla řádně uzavřena. Pokud ano, stiskněte tlačítko „HV ON/OFF“. Nažhavená katoda se rozsvítí a rentgenka začne vyzařovat ionizující záření.
4. Proměřte RTG ze všech stran.
5. Neměřené hodnoty zaznamenejte do předpřipravené tabulky 9, porovnejte s hodnotami radioaktivního pozadí v laboratoři a vyhodnoťte, zda hodnoty nepřekračují limity uvedené v návodu k přístroji.
6. Stiskněte tlačítko „HV ON/OFF“, čímž rentgenka přestane vyzařovat ionizující záření, katoda se schladí a přestane svítit.

Tabulka 9 Měření úniků ionizujícího záření

Strana měření RTG	Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]
Na prázdkno	
Ze předu	
Ze zadu	
Z leva	
Z prava	

#### 4.8.3.3 Měření ionizujícího záření v experimentální komoře RTG

1. Ujistěte se, že ve spodní tlačítkové řadě neblinká, ani nesvítí dioda „HV ON/OFF“ a „SCAN ON/OFF“!!, taktéž zkontrolujte, jestli není katoda rentgenky nažhavená, tedy nesvítí. Pokud ne, odsuňte ochranné sklo experimentální komory.
2. Do komory umístěte spuštěný operativní měřič radiace RADOS RDS-30, nejlépe tak, aby střed měřiče směřoval ke kolimátoru.



Obrázek 4.3 Umístění radiometru v RTG komoře

3. Opatrně zavřete ochranné olověné sklo, nastavte proud RTG aparátu na hodnotu 0,01 mA a napětí na 0 kV.
4. Záření opět spusťte stiskem tlačítka „HV ON/OFF“. Zvyšujte napětí podle hodnot uvedených v tabulce 10 a data z radiometru do ní запиšte. Počkejte, než radiometr zvýšenou hodnotu zaznamená a poté запиšte nejvyšší zpozorovanou hodnotu dávkového příkonu pro každé nastavené napětí. Do protokolu poznamenejte, při jaké hodnotě napětí se spustil akustický alarm radiometru a jakou hodnotu ukazoval.

Tabulka 10 Závislost hodnoty dávkového příkonu na napětí na rentgence

U [kV]	15	16	16,5	16,7	17	17,3	17,5	18
Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]								
U[kV]	18,3	18,5	19	20	21	22	23	23,5
Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]								

- Po dokončení měření záření vypněte tlačítkem „HV ON/OFF“. Nastavte napětí na 16 kV, proud na 0 mA.
- Záření opět spustěte a podobně jako v předešlém měření zvyšujte hodnoty proudů podle tabulky 11 a opisujte hodnoty radiometru. Znovu uveďte, u jaké hodnoty proudu se spustil alarm radiometru a jakou udával hodnotu.

Tabulka 11 Závislost hodnoty dávkového příkonu na proudu rentgenky

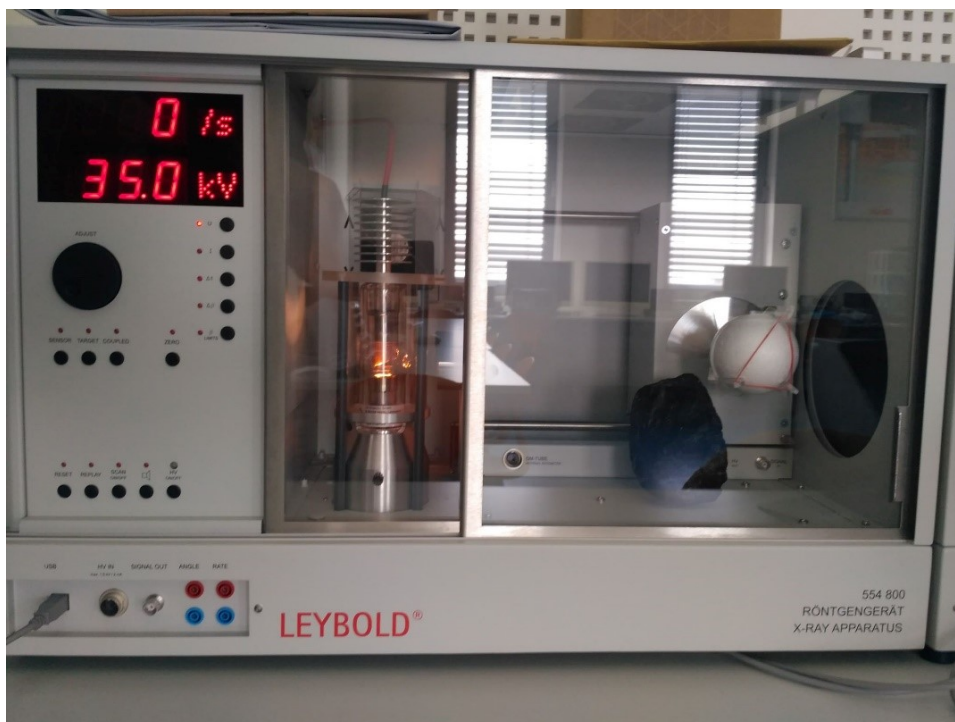
I [mA]	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48
Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]						
I [mA]	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]						

- Z tabulek vytvořte 2 grafy. První graf bude popisovat závislost dávkového příkonu na napětí, druhý graf bude znázorňovat závislost dávkového příkonu na proudu.

#### 4.8.3.4 Měření radiace vzorku zkoumaného v RTG

Od pacientů přicházejících z rentgenového nebo CT vyšetření můžeme často slyšet, že po vyšetření ještě „svítí“. V tomto měření si ověříme, je-li je to pravda nebo pouhá pověra.

- Ujistěte se, že je RTG vypnuté, poté otevřete okno experimentální komory. Vložte do ní kus uhlí a komoru uzavřete.
- Spustěte RTG stisknutím tlačítka „HV ON/OFF“ a nastavte proud a napětí na maximální hodnotu.
- Nechte rentgenku zářit 15 sekund, poté RTG vypněte. Vyčkejte, než se rentgenka zhasne, poté přesuňte uhlí z komory na stůl a proměřte jej radiometrem RDS-30.
- Experiment opakujte s kusem olova. Naměřené hodnoty uveďte v protokolu.
- Opakujte postup pro oba vzorky, tentokrát je ovšem vystavte ionizujícímu záření na dobu 45 sekund.
- Podle naměřených výsledků zhodnoťte, zda je tvrzení mnohých pacientů, že po RTG vyšetření „svítí“ pravdivé nebo nepravdivé.



*Obrázek 4.4 Umístění uhlí v experimentální komoře*

#### 4.9 Kontrolní otázky

1. Proč citlivější radiometry po spuštění naměří hodnotu vyšší než nula i bez přítomnosti radioaktivního zdroje? Co má na této hodnotě největší vliv?
2. Dle výsledku z měření pro bod zadání č.1 určete, jaký druh radioaktivního záření je vyzařován radioaktivními hodinkami.
3. Ve které části hodinek je obsažen radionuklid vyzařující radioaktivní záření a proč je v hodinkách obsažen? Používají se v hodinkách stále radioaktivní materiály?
4. Jaké detektory používají radiometry RADOS RDS-30, PM1208M a RBG T 62 A.
5. Z manuálu k operativnímu měřiči radiace RDS-30 zjistěte, co se stane, překročíte-li maximální měřicí rozsah přístroje.

#### 4.10 Seznam použité literatury

- [A] Záznamník s návodem k obsluze pro radiometr RBG T 62 A
- [B] Příručka uživatele RDS-30 operativní měřič radiace
- [C] Návod k použití dozimetru GUARD AQM-22 – MERA
- [D] Radon detecting indicator SIRAD MR-106N Maintenance manual
- [E] Wrist gamma indicator PM1208M operating manual
- [20] Radioactivity. Nuclear Engineering [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://www.nuceng.ca/igna/radioactivity.htm>

## 5 Vzorový protokol o laboratorní úloze pro měření radioaktivních emisí

Tato kapitola popisuje provedení laboratorní úlohy pro měření radioaktivních emisí. Budou zde uvedeny veškeré naměřené výsledky textovou a numerickou formou, ze kterých budou dle zadání zkonstruovány grafy. Grafy a výsledky budou náležitě popsány a celkové shrnutí výsledků práce bude uvedeno v závěru. Nabyté znalosti poté využijeme k odpovědi na kontrolní otázky.

### 5.1 Cíl úlohy

- Seznámení se s radiometry a pochopení chování radioaktivního záření.
- Možnosti a způsoby stínění radioaktivního záření.
- Víte, co dýcháte? Změřte si to.
- Naučte se rozpoznávat izotop.
- X paprsky kolem nás, jak se chovají?

### 5.2 Zadání

1. Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry.
2. Měření koncentrace radonu v obytných domech.
3. Měření ionizujícího záření emitovaného rentgenkou.

### 5.3 Použité vybavení

- Radiometr RBG T 62 a se sondou a sluchátkem
- Operativní měřič radiace RADOS RDS-30
- Analyzátor plynů GUARD AQM-22 MEPA
- Detektor radonu SIRAD MR-106 N
- Gama detektor PM1208M v hodinkách
- Přírodní zdroj – náramkové hodinky Maják 16 kamenů
- Pásmové měřidlo
- Kancelářský papír
- Karton
- Dřevo
- Olověná guma

### 5.4 Vstupní otázky

1. Kde se nachází střed detektoru RADOS RDS-30, GUARD AQM-22 MEPA a gama detektor PM1208M?
  - Odpověď na otázku je vyobrazena ve výsledcích pro první bod zadání.
2. V jakých jednotkách a veličinách měří všechny dostupné radiometry?



- RADOS RDS-30 -  $\mu\text{Sv/h}$
  - PM1208M -  $\mu\text{Sv/h}$  a  $\mu\text{Sv}$
  - GUARD AQM-22 –  $\mu\text{R/h}$
  - RBG T 62 A –  $\text{mr/hod.}$  a  $\text{rozpady/min.cm}^2$
3. Z manuálu zjistíte, jak dlouho musí minimálně probíhat měření radonu detektorem SIRAD MR-106 N?
    - Minimálně 4 hodiny
  4. Co je potřeba udělat s radiometrem RBG T 62 před začátkem měření?
    - Spustit v režimu kontroly napětí a nastavit ručičku do pozice KN
  5. Je třeba se obávat  $\alpha$  a  $\beta$  záření?
    - Záření  $\alpha$  a  $\beta$  je potřeba se obávat, dojde-li k vnitřní kontaminaci těla, např. inhalací prachové částice nebo jejím pozřením společně s jídlem. Vnitřní tkáň orgánů, například plic, není
  6. Jaké jsou 4 základní principy ochrany před radioaktivním zářením?
    - Ochrana časem, vzdáleností, stíněním a před povrchovou a vnitřní kontaminací

## 5.5 Postup měření

Tato kapitola popisuje jednotlivé kroky, které jsme provedli při praktickém provedení úlohy.

### 5.5.1 Postup pro bod zadání č.1: Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry

#### 5.5.1.1 Měření přírodního zdroje všemi dostupnými radiometry

1. Prostudovali jsem si všech 5 dostupných manuálů k radiometrům.
2. Spustili jsme operativní měřič radiace RADOS RDS-30 a odečetli hodnotu dávkového příkonu, která byla na displeji. Následně jsme jeho střed přiložili k ciferníku radioaktivních hodinek a nejvyšší naměřenou hodnotu jsme si po 40 sekundách poznamenali.
3. Stejný postup jsme opakovali pro ostatní měřiče. U radiometru RBG T 62 se postup mírně lišil, před měřením jej bylo zapotřebí spustit v režimu kontroly napětí a nastavit ručičku na rysku KN. Taktéž bylo nutné připojit a nastavit sondu. Pro radiometr v hodinkách PM1208M jsme zvolili režim měření DER (dle návodu).

#### 5.5.1.2 Měření přírodního zdroje na různé vzdálenosti

1. Natáhli jsme pásmové měřidlo na jeden metr a na něj jsme umístili radioaktivní hodinky a operativní měřič radiace RDS-30.
2. Ciferník jsme nastavili tak, aby byl 5 mm od středu radiometru.
3. Z displeje radiometru jsme po 20 sekundách měření zaznamenali nejvyšší hodnotu a posunuli jej na další vzdálenost, která byla definována v tabulce 6.

#### **5.5.1.3 Měření přírodních zdrojů v závislosti na stínění**

1. Podle pásmového měřidla jsme umístili operativní měřič radiace RDS-30 (jeho střed) 5 mm od ciferníku radioaktivních hodinek.
2. Nejdříve jsme si zaznamenali hodnotu dávkového příkonu bez jakéhokoliv stínění, poté jsme mezi radiometr a ciferník radioaktivních hodinek vložili stínění v podobě kancelářského papíru.
3. Měnící se hodnoty jsme nechali ustálit a zapsali do tabulky.
4. Měření jsme poté opakovali s jinými druhy stínění – kartonem, dřevem a olověnou gumou.

#### **5.5.2 Postup k bodu zadání č.2: Měření koncentrace radonu**

Měření úlohy se odehrávalo mimo univerzitní laboratoř. Radiometr SIRAD MR-16 N byl zapůjčen pro měření v libovolných prostorech z důvodu časové náročnosti měření.

1. SIRAD MR-16 jsme spustili a vytáhli stojan ze zadní části přístroje, aby k průduchům mohl volně přistupovat vzduch.
2. Radiometr jsme umístili do zvolené místnosti a po 4 hodinách jsme si poznamenali první hodnotu koncentrace radonu v místnosti. Po 20 hodinách jsme odepsali druhou hodnotu koncentrace radonu a přemístili jsme SIRAD MR-16 do jiné místnosti.
3. Stejným způsobem probíhalo měření i v dalších dvou místnostech.

#### **5.5.3 Postup k bodu zadání č.3: Paprsky X kolem nás a jak se chovají**

V tomto bodu zadání jsme se učili základy práce s RTG. Vyzkoušeli jsme si jeho ovládání a používání.

##### **5.5.3.1 Seznámení se s RTG Leybold**

1. Po prostudování přiloženého návodu jsme si vypsali požadované hodnoty a vyfotografovali RTG a rentgenku.
2. Ujistili jsme se, že jsou obě olověná krycí skla uzavřena a RTG jsme spustili.
3. Se spuštěným RTG jsme si vyzkoušeli základní ovládání RTG tím, že jsme si nastavovali různá napětí a proudy.

##### **5.5.3.2 Měření ionizujícího záření v okolí RTG**

1. Spustili jsme operativní měřič radiace RDS-30 a RTG, které jsme nastavili na maximální výkon a proud.
2. RTG jsme proměřili ze všech stran (zepředu, zboku, zezadu, shora) a naměřené hodnoty zapsali do tabulky a porovnali s maximální přípustnou hodnotou uvedenou v manuálu.

##### **5.5.3.3 Měření ionizujícího záření v experimentální komoře RTG**

1. Ověřili jsme si, že neblíká, či nesvíí jak dioda „HV ON/OFF“ tak „SCAN ON/OFF“ a otevřeli jsme ochranné dvířka experimentální komory.

2. Do komory jsme podle obrázku 4.3 umístili radiometr RDS-30 tak aby jeho střed mířil na kolimátor a zároveň bylo vidět na displej.
3. Olověné sklo jsme zavřeli, nastavili proud na hodnotu 0,01 mA a napětí na 0 kV.
4. Spustili jsme záření a nastavovali jednotlivé hodnoty napětí podle tabulky. U každé hodnoty napětí jsme odečetli i hodnotu dávkového příkonu a zapsali do tabulky.
5. Po ukončení měření jsme vypnuli záření, napětí nastavili na 16 kV a proud na 0 mA.
6. Záření jsme znovu spustili a nastavili hodnotu proudu uvedenou v tabulce. Hodnotu dávkového příkonu jsme opsali z displeje RDS-30 a zaznamenali do tabulky. Stejně jsme postupovali pro další hodnoty proudu v tabulce.

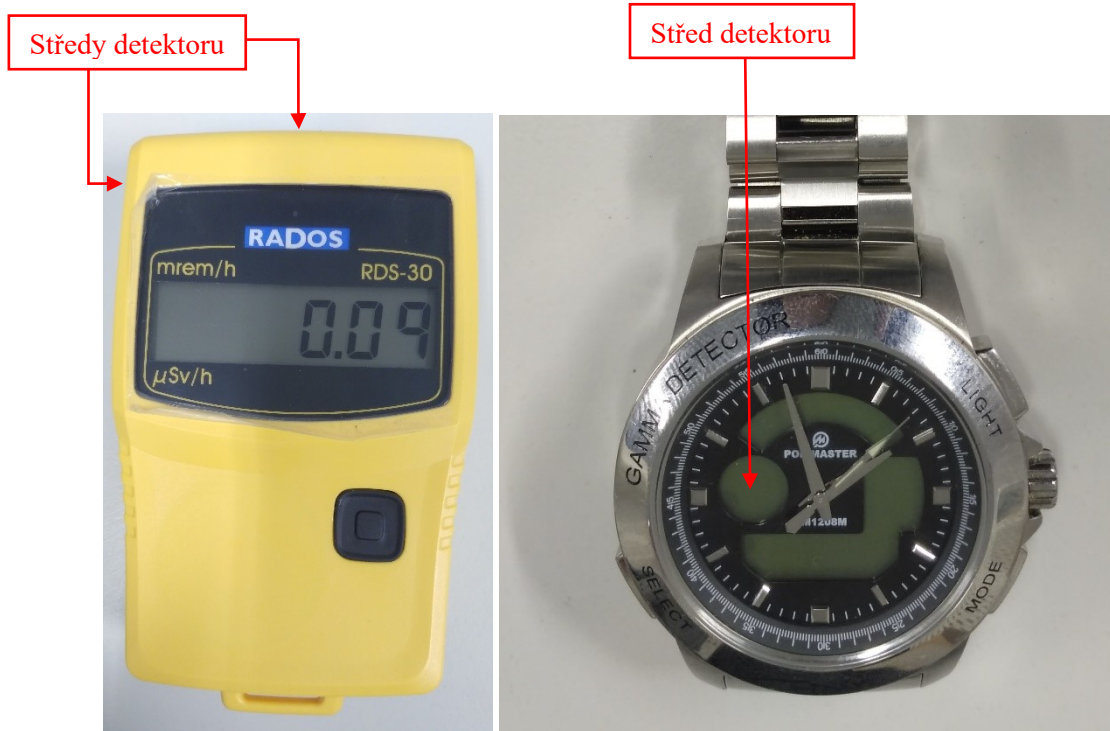
#### **5.5.3.4 Měření radiace vzorku zkoumaného v RTG**

1. Poté co jsme se ujistili, že je RTG vypnuté jsme otevřeli ochranné sklo experimentální komory a vložili do něj kus uhlí.
2. Uhlí jsme 15 sekund ozařovali na maximální výkon, poté jsme RTG vypnuli, uhlí vyjmuli a proměřili radiometrem RDS-30.
3. Stejný postup jsme opakovali pro kus olova.
4. Oba vzorky jsme následně ozářili na 45 sekund, proměřili a porovnali s předchozími výsledky.

## 5.6 Výsledky

### 5.6.1 Výsledky pro bod zadání č.1: Měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry

Na úvod měření jsme si prostudovali manuály k poskytnutým radiometrům. Aby mohlo měření probíhat správně, bylo nejdříve nutné zjistit středy detektorů.



Obrázek 5.1 Středy detektorů RDS-30 a PM1208M



Obrázek 5.2 Střed detektoru GUARD AQM-22 MEPA

#### 5.6.1.1 Měření přírodního zdroje všemi dostupnými radiometry

Tabulka 12 obsahuje naměřená data všemi dostupnými radiometry bez přítomnosti zdroje a s bezprostřední blízkosti zdroje radioaktivního záření. U radiometru RBG T 62 je naměřena hodnota 0, protože námi používaný zdroj záření má nižší energii než 0,4 MeV, což je nejnižší energie záření, kterou je tento radiometr schopen zaznamenat.

Tabulka 12 Naměřený dávkový příkon různými radiometry

	RDS-30	AQM-22	PM1208M	RBG T 62
Bez zdroje záření	0,17	15	0,20	0
Radioaktivní hodinky	5,11	430	4,11	0
Jednotka	μSv/h	μR/h	μSv/h	Rozpady/min.cm <sup>2</sup>

$$15 \frac{\mu R}{h} * 0,01 = 0,15 \mu Sv/h$$

#### 5.6.1.2 Měření přírodního zdroje na různé vzdálenosti

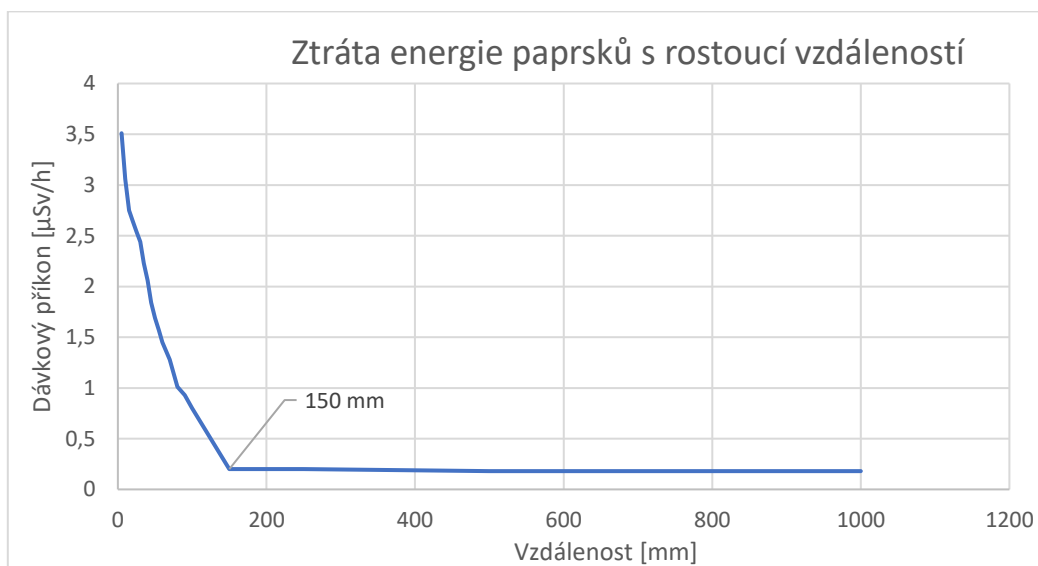
Níže uvedená tabulka 13 udává naměřené hodnoty dávkového příkonu na rostoucí vzdálenost.

Tabulka 13 Dávkový příkon v závislosti na vzdálenosti měřiče od zdroje

Vzdálenost [mm]	Dávkový příkon [μSv/h]	Vzdálenost [mm]	Dávkový příkon [μSv/h]
5	3,51	55	1,57
10	3,06	60	1,45
15	2,75	70	1,28
20	2,65	80	1,01
25	2,54	90	0,93
30	2,44	100	0,80
35	2,23	150	0,20
40	2,06	250	0,20
45	1,84	500	0,18
50	1,69	1000	0,18

Graf 2 vyobrazuje oslabení radioaktivní emise při průchodu plynným prostředím, v našem případě se projevuje úbytkem dávkového příkonu. Dávkový příkon s rostoucí

vzdáleností klesal nelineárně a při vzdálenosti 150 mm již radiometr nezaznamenával žádné zvýšené hodnoty radiace. Výsledky měření potvrzují známý fakt, který tvrdí, že nejefektivnější ochrana před radioaktivním zářením je dodržování dostatečné vzdálenosti od jeho zdroje.



*Graf 2 Dávkový příkon s rostoucí vzdáleností*

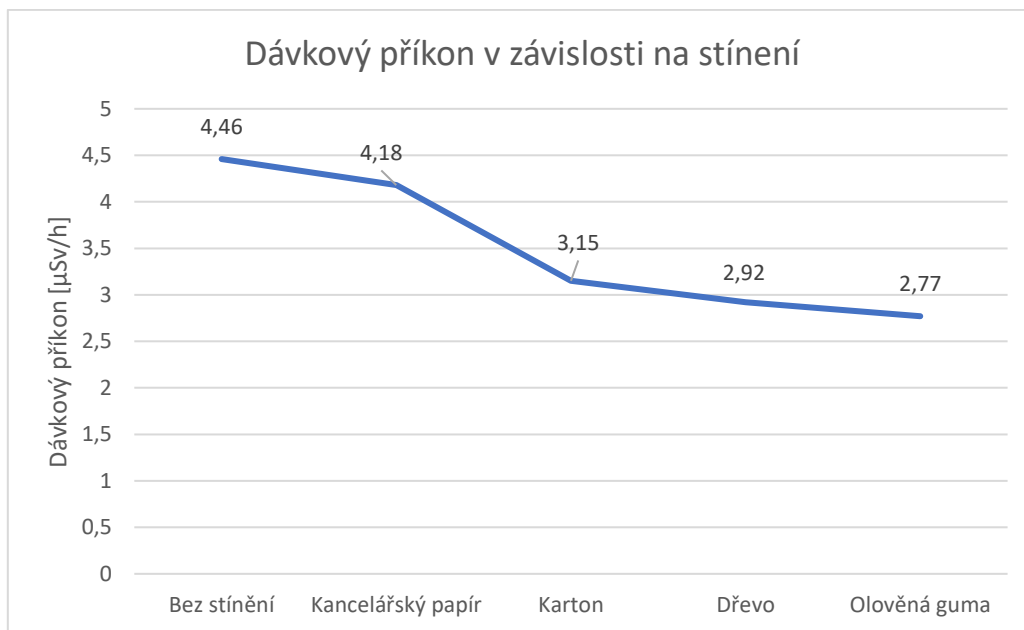
#### 5.6.1.3 Měření přírodních zdrojů v závislosti na stínění

Tabulka 14 obsahuje naměřené hodnoty dávkového příkonu po průchodu radioaktivního záření skrze různé typy stínění. Při počítání procentuálního úbytku považujeme hodnotu dávkového příkonu bez stínění jako 0 % úbytek, snížení dávkového příkonu průchodem prostředím zanedbáváme.

*Tabulka 14 Úbytek radiace po průchodu stínícím materiálem*

Typ stínění	Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Procentuální úbytek [%]
Bez stínění	4,46	0 %
Kancelářský papír	4,18	6,27 %
Karton	3,15	29,37 %
Dřevo	2,92	34,53 %
Olověná guma	2,55	42,83 %

Z grafu 3 můžeme vyčíst efektivitu stínících materiálů pro stínění radioaktivity. Vzhledem k tomu, že velké procento záření prošlo i skrze olověnou gumu, můžeme vydedukovat, že se jedná o záření gama, jelikož záření alfa by neprošlo ani skrze kancelářský papír a záření beta je stínitelné i tenkou vrstvou dřeva.



Graf 3 Měření záření gama po průchodu stínícím materiálem

### 5.6.2 Výsledky k bodu zadání č.2: Měření koncentrace radonu

Maximální průměrná hodnota objemové aktivity radonu ve stávajících budovách:  $400 \text{ Bq/m}^3$

V tabulce 15 jsou opsány výstupní hodnoty radonového monitoru SIRAD MR – 106 N. Všechny naměřené hodnoty splňují doporučené limity koncentrace radonu v obytných místnostech. Naměřené hodnoty pro 4 a 24 hodin se v místnosti 2 a 3 nijak významně nelišily. Velký rozdíl je patrný při měření v místnosti 1. Snížení koncentrace radonu bylo patrně způsobeno vyvětráním místnosti.

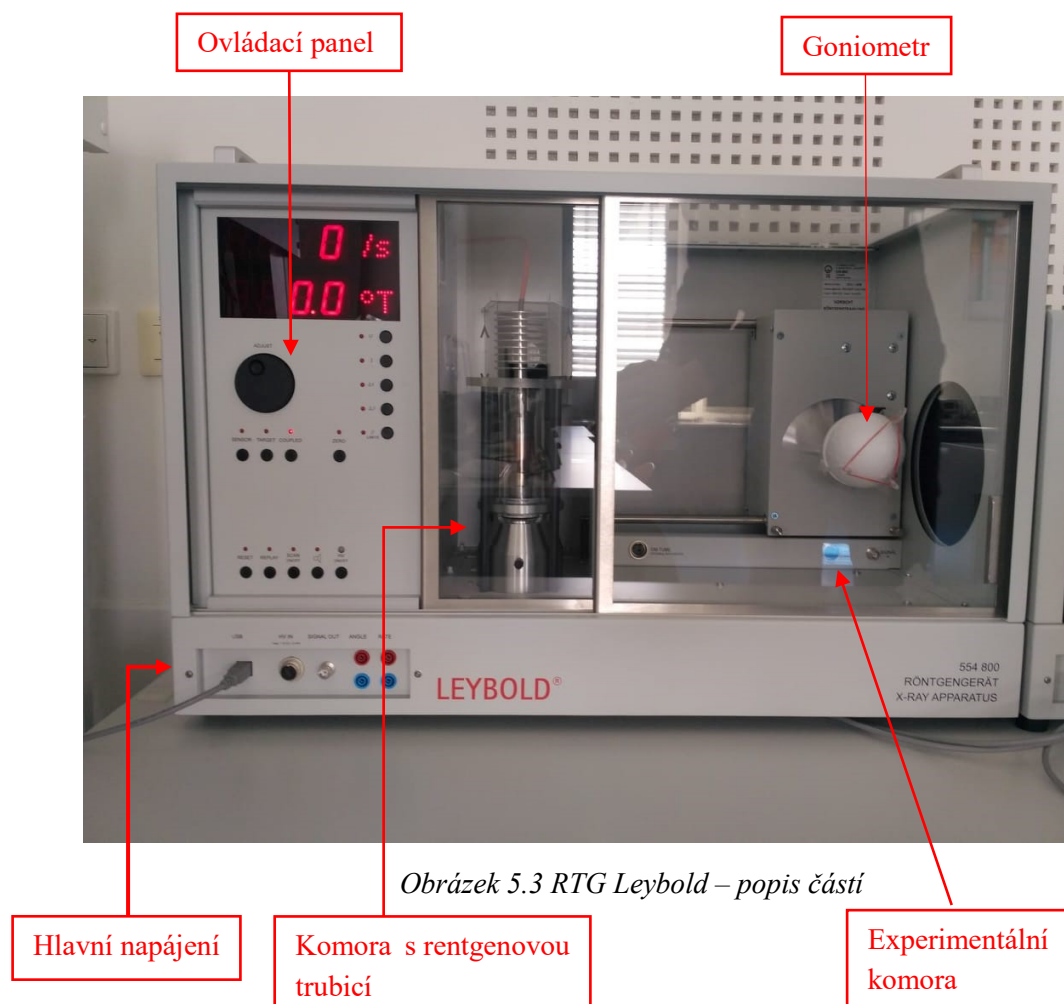
Tabulka 15 Naměřená koncentrace radonu v místnostech

Doba měření	4 hodiny	24 hodin
Místnost 1	$119 \text{ Bq/m}^3$	$85 \text{ Bq/m}^3$
Místnost 2	$72 \text{ Bq/m}^3$	$74 \text{ Bq/m}^3$
Místnost 3	$54 \text{ Bq/m}^3$	$54 \text{ Bq/m}^3$

### 5.6.3 Výsledky k bodu zadání č.3: Paprsky X kolem nás a jak se chovají

#### 5.6.3.1 Seznámení se s RTG Leybold

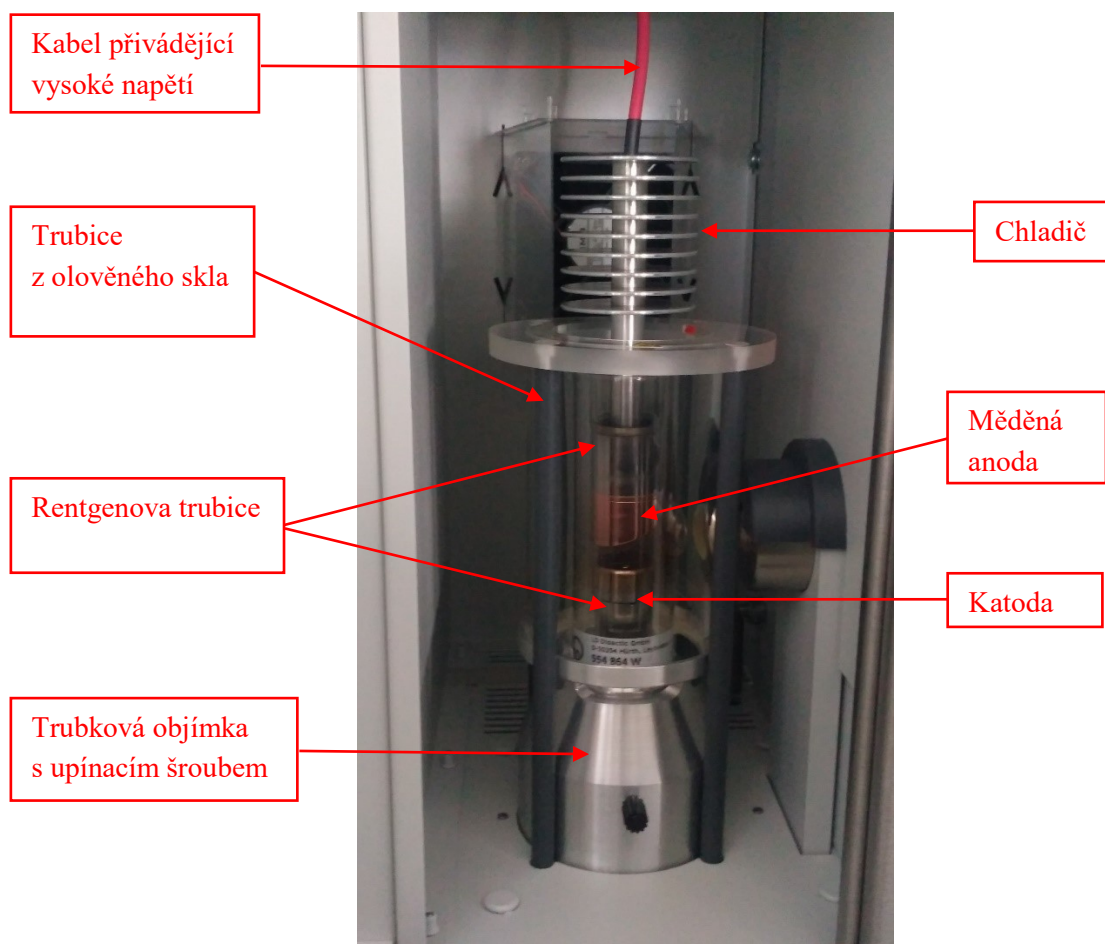
Obrázek 5.3 vyobrazuje RTG značky Leybold a popis jeho stěžejních částí podle manuálu přístroje. RTG aparát je vybaven experimentální komorou a komorou pro rentgenovou trubici, obě chráněny olovnatým sklem před únikem radiace.



Na kontrolním panelu je možné nastavit napětí v rozsahu o 0 do 35 kV (DC) a proud od 0 do 1 mA. Kontrolní panel také nabízí možnost ovládání goniometru. Dávkový příkon uvnitř experimentální komory při nejvyšším nastaveném výkonu může překročit i 10 Sv/h. Díky ochranným olovnatým sklům nepřekračují hodnoty dávkového příkonu v okolí RTG 1  $\mu\text{Sv/h}$ .

RTG Leybold nabízí rentgenové trubice s měděnou nebo wolframovou elektrodou. Trubice je umístěna za ochranným olovnatým sklem, záření X se do experimentální komory dostává skrze kolimátor. Na níže uvedeném obrázku 5.4 je vyobrazena rentgenka s popisem jejích stěžejních částí.





Obrázek 5.4 Rentgenka a její stěžejní části – popis částí

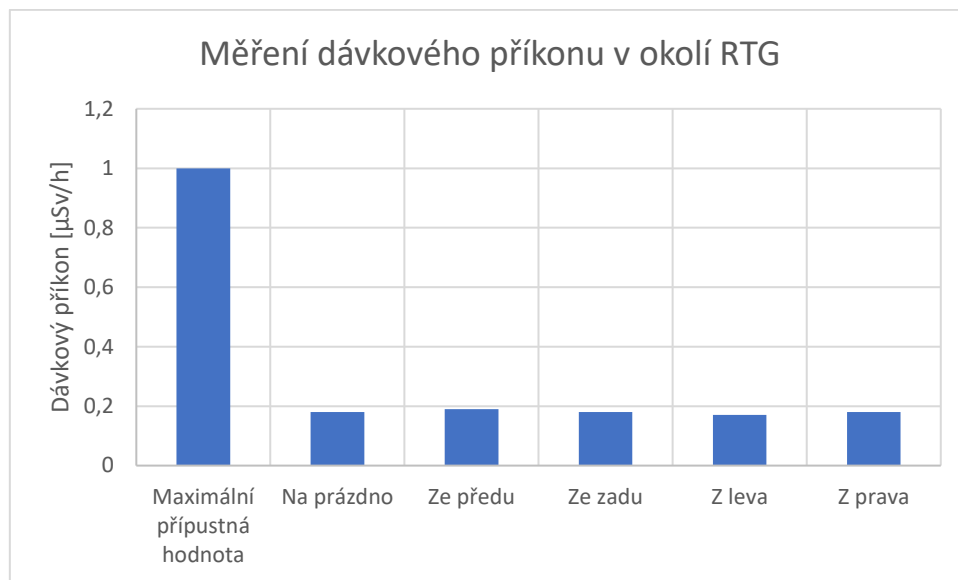
#### 5.6.3.2 Měření ionizujícího záření v okolí RTG

Maximální přípustná hodnota dávkového příkonu v okolí přístroje by podle manuálu neměla být vyšší než  $1 \mu\text{Sv/h}$ . Měření bylo provedeno se zavřenými ochrannými skly při záření na plný výkon, tj.  $U = 35 \text{ kV}$ ,  $I = 1 \text{ mA}$ .

Tabulka 16 Bezpečnostní měření kolem RTG přístroje

Strana měření RTG	Dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ]
Na prázdkno	0,18
Ze předu	0,19
Ze zadu	0,18
Z leva	0,17
Z prava	0,18

Naměřený dávkový příkon při nejvyšším výkonu rentgenové trubice splňoval manuálem slibované limity. Dávkový příkon v okolí aktivního přístroje byl dokonce tak nízký, že se téměř nelišil hodnotám naměřeným v laboratoři bez jakéhokoliv zdroje radioaktivního nebo ionizujícího záření. Grafické tyto hodnoty znázorňuje níže uvedený graf 4.



Graf 4 Grafické znázornění bezpečnostního měření

#### 5.6.3.3 Měření ionizujícího záření v experimentální komoře RTG

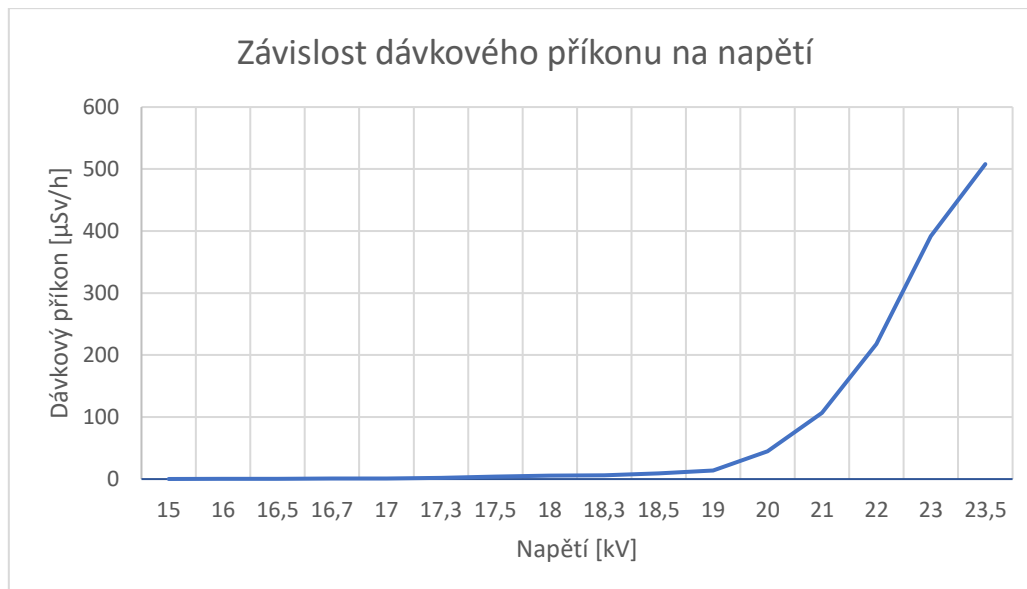
Během tohoto měření byl proud na RTG nastaven na minimální hodnotu vyšší než nula, tedy 0,01 mA, po zbytek měření se již neměnil. Při měření dávkového příkonu pro nastavená napětí nižší než 15 kV se hodnoty pohybovaly mezi 0,10 až 0,19 μSv/h. Naměřené hodnoty při vyšších hodnotách napětí nemusí být exaktní, protože při měření hodně kolísaly. Z operativního měřiče radiace byla vždy opsána nejvyšší naměřená hodnota po 10 – 15i sekundovém čekání.

Tabulka 17 Závislost dávkového příkonu na napětí na rentgence

U [kV]	15	16	16,5	16,7	17	17,3	17,5	18
Dávkový příkon [μSv/h]	0,19	0,34	0,58	0,77	1,15	1,98	3,80	5,52
U[kV]	18,3	18,5	19	20	21	22	23	23,5
Dávkový příkon [μSv/h]	6,19	9,13	13,90	45,00	107,00	218,00	392,00	508,00

Grafické znázornění závislosti dávkového příkonu na napětí při minimálním proudu vyobrazuje graf 5. Do napětí 17 kV rostl dávkový příkon minimálně, velký růstový skok můžeme pozorovat kolem 19 kV, od této hodnoty stoupal dávkový příkon rapidně. Měření bylo ukončeno

u hodnoty 23,5 kV, kdy naměřený dávkový příkon dosahoval poloviny maximálního měřicího rozsahu přístroje, u dalšího navyšování napětí by došlo k překročení měřicího rozsahu, akumulaci dávky měřičem a následné nepřesné měření.



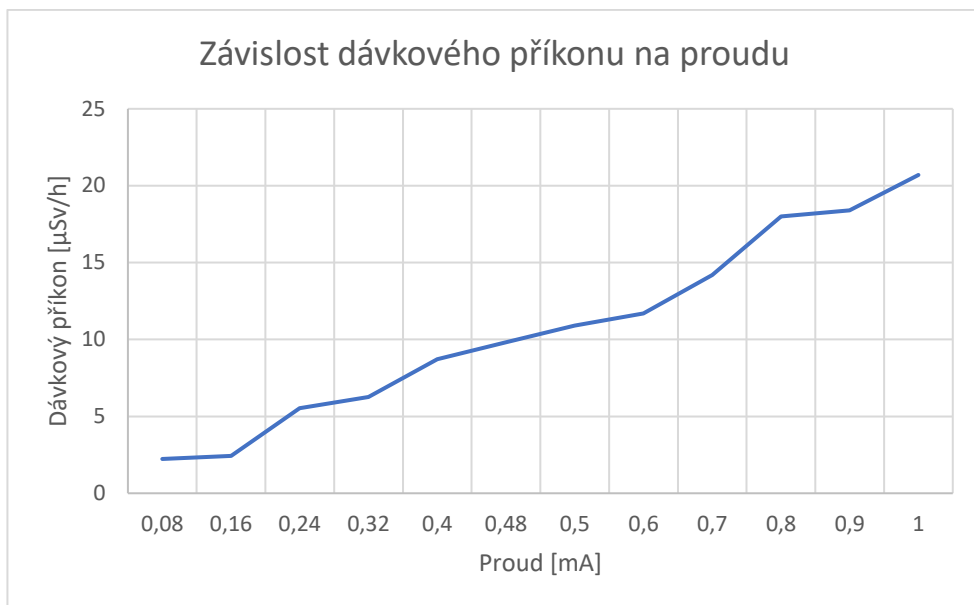
*Graf 5 Graf závislosti dávkového příkonu na napětí nastaveném na RTG*

Po měření závislosti dávkového příkonu záření X na napětí jsme měřili závislost stejné veličiny na proudu. Tentokrát jsme napětí nenastavili na hodnotu blízkou nule, ale na 16 kV. Při napětí pod 16 kV proud nijak neovlivňoval dávkový příkon, záření bylo moc slabé.

*Tabulka 18 Závislost dávkového příkonu na proudu na rentgence*

I [mA]	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48
Dávkový příkon [μSv/h]	2,23	2,42	5,54	6,27	8,72	9,81
I [mA]	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Dávkový příkon [μSv/h]	10,90	11,70	14,20	18,00	18,40	20,70

Dávkový příkon při regulaci proudu stoupal pozvolněji než při regulaci napětí. Po zhruba dvacetinásobném zvětšení proudu se dávkový příkon také zvýšil zhruba desetinásobně. Křivka grafu stoupala téměř lineárně.



*Graf 6 Graf závislosti dávkového příkonu na proudu nastaveném na RTG*

Z výsledných grafů a hodnot naměřených v tomto bodu zadání tedy usuzujeme, že hlavní vliv na dávkový příkon má napětí. Proud má na velikosti dávkového příkonu taktéž vliv, ovšem ne tak velký jako napětí. Pro přesnější nastavení dávky je proto vhodnější použít nižší napětí regulované proudem, pro vyšší hodnoty napětí je sice dávkový příkon mnohonásobně větší, ovšem hodnoty dávkového příkonu nejsou tak stabilní.

#### **5.6.3.4 Měření radiace vzorku zkoumaného v RTG**

Po ozáření vzorků na 15 sekund jsme naměřili pro uhlí dávkový příkon 0,20  $\mu\text{Sv/h}$ , pro olovo 0,19  $\mu\text{Sv/h}$ . Při dalším měření, ovšem tentokrát na 45 sekund jsme naměřili téměř stejné hodnoty – pro oba vzorky 0,20  $\mu\text{Sv/h}$ . Tyto hodnoty dávkového příkonu jsou stejné, jako ty naměřené v laboratoři bez přítomnosti radioaktivního ani ionizujícího záření. Odečteme-li radioaktivní pozadí laboratoře od našich hodnot, dostaneme hodnoty nulové.

Nulové naměřené hodnoty jsou správné. Ve chvíli, kdy ionizující záření dopadalo na vzorek, v našem případě uhlí nebo olovo, bylo samo zdrojem ionizujícího záření. Jakmile na něj ovšem ionizující záření dopadat přestane, vzorek přestane být zdrojem ani záření neakumuluje. To samé platí i pro pacienta na RTG vyšetření.

## 5.7 Kontrolní otázky

1. Proč citlivější radiometry po spuštění naměří hodnotu vyšší než nula i bez přítomnosti radioaktivního zdroje? Co má na této hodnotě největší vliv?
  - Radiometry neukazují nulovou hodnotu, protože měří radioaktivní pozadí. Největší podíl na radioaktivním pozadí má radon a jeho rozpadové prvky, poté kosmické záření.
2. Dle výsledku z měření pro bod zadání č.1 určete, jaký druh radioaktivního záření je vyzařován radioaktivními hodinkami.
  - Vzhledem k tomu, že radioaktivní záření prošlo jak dřevem, tak olověnou gumou, jedná se s jistotou o záření  $\gamma$ . Není však vyloučeno, že radium-226 obsáhlé v hodinkách, nebo jeho rozpadové prvky nevyzařuje i  $\alpha$  a  $\beta$  záření.
3. Ve které části hodinek je obsažen radionuklid vyzařující radioaktivní záření a proč je v hodinkách obsažen? Používají se v hodinkách stále radioaktivní materiály?
  - Radionuklid je obsažen v ručičkách hodinek. Některé radioaktivní materiály se vyznačují silnější svítivostí než fosfor. V minulosti se tedy často s fosforem míchaly a vytvářela se z nich svítivá barva. V současnosti se již kvůli jejích negativním vlivům na zdraví nesmí používat.
4. Jaké detektory používají radiometry RADOS RDS-30, PM1208M a RBG T 62 A.
  - RADOS RDS-30 - Jedna energeticky kompenzovaná GM trubice
  - PM1208M - GM trubice
  - RBG T 62 A - Nízkonapěťová plášťová GM trubice
5. Z manuálu k operativnímu měřiči radiace RDS-30 zjistěte, co se stane, překročíte-li maximální měřicí rozsah přístroje a jak s tímto stavem naložíme.
  - Spustí se akustický alarm signalizující akumulaci dávky radiometrem. Alarm se nevyruší ani po restartování radiometru. Měření pokračuje dál i se spuštěným alarmem, ovšem značně nepřesně. Podle manuálu je potřeba akumulovanou dávku vynulovat, poté můžeme v měření pokračovat.

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření laboratorní úlohy pro měření radioaktivních emisí. Laboratorní úloha byla koncipována tak, aby byla z části měřena v univerzitní laboratoři a z části ve studentem zvolených místnostech. Student při vypracování a měření úlohy získá teoretický i praktický základ ohledně měření radiace a ionizujícího záření, také se před zářením naučí chránit. Součástí je i práce s RTG aparátem, který se student v průběhu laboratorní úlohy učí ovládat.

Před samotným měřením úlohy je zapotřebí, aby student prostudoval všechny manuály, uvedené v kapitole předpokládané znalosti. Po prostudování manuálů by měl být student schopen odpovědět na vstupní otázky, jež jsou koncipovány tak, aby studentovu pozornost zacílili na informace, které jsou pro měření nezbytné.

Úlohy jsou rozděleny do 3 zadání. První bod je měření velikosti radiace přírodního zdroje různými radiometry. Tento bod zadání je dále rozdělen do dalších podkapitol. V první podkapitole se klade důraz na to, aby si student vyzkoušel změřit radioaktivní zdroj všemi dostupnými radiometry na krátkou vzdálenost, přičemž pak porovnává naměřené hodnoty a jednotky jednotlivých měřičů. V další podkapitole má student za úkol proměřit radioaktivní zdroj na různé vzdálenosti. Účel tohoto je, aby se student naučil před radiací chránit vzdáleností a ověřil si, že měřený dávkový příkon radioaktivního záření je silně ovlivněn vzdáleností, kterou musí záření urazit. Jednotlivé vzdálenosti, na které je zdroj měřen byly navrženy tak, aby byl krok mezi různými vzdálenostmi poměrně malý, čímž je postupný pokles dobře pozorovatelný v grafu. Počáteční a poslední hodnota jsou také voleny tak, aby byla na jednom konci naměřena maximální hodnota a na druhém konci hodnota nulová, tedy hodnota radioaktivního pozadí v laboratoři. V poslední části tohoto bodu zadání je radioaktivní zdroj měřen na vzdálenost 5 mm a mezi něj a měřič jsou vkládány různé stínící materiály. Z naměřených hodnot je počítán procentuální úbytek, z čehož je možno vydedukovat typ záření, které radioaktivní hodinky vyznačují.

Druhý bod zadání - měření koncentrace radonu v obytných domech, je studentem měřen v něm zvoleném prostředí, nejlépe ovšem v obytných prostorech. Měření probíhá celkem 72 hodin, v každé místnosti 24 hodin. Student opisuje jednu hodnotu koncentrace radonu po minimální době měření, tedy 4 hodiny, druhou hodnotu po 24 hodinách. Pak přesouvá měřič koncentrace radonu do další místnosti.

Třetí bod zadání - měření ionizujícího záření emitovaného rentgenkou, je znovu rozdělen na 4 částí. První část je jako v předešlém měření pouze seznamovací. Zadání studenta nabádá aspoň zběžnému studiu manuálu RTG, poté si jej zkouší spustit a vyzkoušet si základní ovládací prvky, tedy nastavení napětí a proudu. Jakmile se student naučí základní operace s RTG aparátem, přistupuje se k druhé části, kdy je RTG spuštěno na maximální výkon a operativním měřičem radiace RDS-30 probíhá bezpečnostní měření úniků ionizujícího záření ze všech stran RTG, které se následně porovnává z maximálními přípustnými hodnotami, které udává manuál. Splňuje-li RTG příslušné bezpečnostní požadavky, přistupuje se k dalšímu bodu. Radiometr RDS-30 je umístěn do experimentální komory, proud RTG je nastaven na minimální nenulovou hodnotu,

napětí se poté reguluje podle tabulkou předepsaných hodnot. Student opisuje naměřené hodnoty dávkového příkonu pro různá nastavená napětí. Napětí byla volena tak, aby záření nepřekročilo maximální měřicí rozsah radiometru. Následující měření je podobné, tentokrát ovšem nastavíme napětí na konstantní hodnotu 16 kV a při měření regulujeme proud od minimální po maximální hodnotu. Z naměřených dávkových příkonů se zhotovuje graf se závislostmi dávkového příkonu na regulované hodnotě. Poslední měření testujeme akumulaci ionizujícího záření materiálu zkoumaného v RTG. Po dobu 15, poté 45 sekund ozařujeme uhlí a olovo a proměřujeme radiometrem. Účel je naměřit nulové hodnoty a potlačit tím radiofobii z vyšetření na RTG.

Na základě výsledků měření a nové nabytých poznatků byly zkonstruovány kontrolní otázky, na které by student po vypracování protokolu a nastudování materiálů uvedených v předpokládaných znalostech již měl znát odpovědi.

### **Přínos laboratorní úlohy pro studenta**

Po měření by student měl ovládat práci s různými druhy radiometrů a změřit s nimi dávkový příkon jak přírodního, tak umělého zářiče. Bude vědět, jak se mění energie radioaktivního záření po průchodu prostředím na různé vzdálenosti a po průchodu různými materiály. Podle toho také bude schopen určit, o jaký druh záření se jedná. Taktéž bude umět změřit koncentraci radonu v místnostech a bude si vědom doporučených limitů a případných následků pro organismus při jejich překročení.

Student se rovněž naučí základní ovládání RTG a na tyto základy poté může navázat v pokročilejších úkonech s tímto přístrojem. Bude schopen provést bezpečnostní kontrolu případného uniku ionizujícího záření do bezpečné zóny kolem pracoviště RTG. Uvědomí si, jaký vliv má na energii ionizujícího záření proud a napětí na rentgence. Po porovnání naměřených hodnot dávkového příkonu radioaktivních hodinek a maximálních hodnot dávkového příkonu RTG si bude schopen lépe představit potenciální nebezpečnost záření X při nevhodném použití.

## Použitá literatura

- [1] LNĚNIČKOVÁ, Ludmila a Jana PUČOVÁ. Radioaktivita. *WechChemie* [online]. 2014 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.webchemie.cz/radioaktivita.html>
- [2] ULLMANN, Vojtěch. Radioaktivita. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [3] Gamma Decay. In: TutorVista [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://chemistry.tutorvista.com/nuclear-chemistry/gamma-decay.html>
- [4] ULLMANN, Vojtěch. Radionuklidy. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>
- [5] Přírodní radioaktivita. In: *Český svaz vědeckotechnických společností* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <http://spolky.csvts.cz/cns/news11/radio2.pdf>
- [6] *Státní úřad radiační ochrany, v. v. i.* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz>
- [7] ULLMANN, Vojtěch. Biologické účinky ionizujícího záření. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>
- [8] PENHAKER, Marek. Rentgenka. In: *Technika zřízení. Radioterapie.* s. 115.
- [9] VZNIK RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/k21.htm>
- [10] Veličiny a jednotky. *Dteke ionizujícího záření* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <http://www.radioaktivita.cz/jednotky.html>
- [11] *Faktory ovlivňující biologické účinky ionizujícího záření.* České Budějovice, 2010. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Doc. Dr. Ph. D. Friedo Zölzer.
- [12] ULLMANN, Vojtěch. Elementární částice a urychlovače. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika5.htm#Urychlovace>
- [13] NOVÁK, Tomáš. *Limity dávek radioterapie pro rizikové orgány.* Olomouc, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Palackého.
- [14] ULLMANN, Biologické účinky ionizujícího záření. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>



- [15] Is Your Watch Radioactive? How That Luminous Dial Gets Its Glow. Bloomberg [online]. 2018 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-07-09/what-makes-luminous-watch-dials-glow-a-brief-history-of-shine>
- [16] ULLMANN, Vojtěch. 2. Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. *Astronuklfyzika* [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#2>
- [17] Záznamník s návodem k obsluze pro radiometr RBG T 61 A čis.12760. 1964.
- [18] RDS-30 Operativní měřič radiace, Příručka uživatele: Verze 1.10.
- [19] Dozimetr s detektorem nebezpečných plynů GUARD AQM-22 - Mera: Návod k použití.
- [20] Radioactivity. Nuclear Engineering [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://www.nuceng.ca/igna/radioactivity.htm>
- [21] The X-ray Tube. *Radiology Key* [online]. 2016 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://radiologykey.com/the-x-ray-tube-2/>



